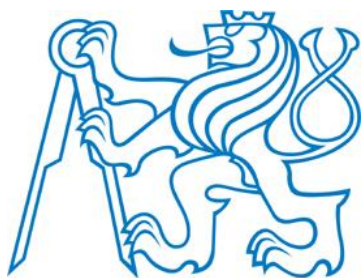


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Michal Burda

2016



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTROTECHNOLOGY

Simulace aktivních filtrů

Activefilterssimulation

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Michal Burda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Karel Künzel, CSc.

Praha, 2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Michal Burda**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Simulace aktivních filtrů**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem a funkcí aktivních filtrů.
2. Seznamte se se zapojením a principem činnosti hybridních filtrů.
3. Sestavte simulační model aktivního a hybridního filtru.
4. Ověřte funkci modelů a porovnejte je mezi sebou.
5. Na modelu hybridního filtru ověřte vliv vybraných parametrů.
6. Navrhněte algoritmus řízení aktivní části hybridního filtru.

Seznam odborné literatury:

- [1] Hideaki Fujita, Hirofumi Akagi: A PRACTICAL APPROACH TO HARMONIC COMPENSATION IN POWER SYSTEMS- SERIES CONNECTION OF PASSIVE AND ACTIVE FILTERS
- [2] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes: INSTANTANEOUS POWER THEORY AND APPLICATIONS TO POWER CONDITIONING, Willey 2007
- [3] Hájek J.: Vliv zařízení inteligentní budovy na kvalitu elektrické energie, Diplomová práce, ČVUT v Praze, FEL Praha 2012

Vedoucí: Ing. Karel Künzel, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 30. 3. 2016

ABSTRAKT

Práce se zabývá konceptem aktivního síťového filtrování. Aktivní síťové resp. výkonové filtry se většinou používají pro filtrování vyšších harmonických. Metoda použita v této práci je založena na P-Q teorii, neboli teorii okamžitých výkonů a kromě filtrování vyšších harmonických a dovoluje kompenzovat i jalový výkon a kolísání základní složky napětí. Jsou vytvořeny dva simulační modely aktivních filtrů v prostředí Matlab Simulink a jsou testovány na vybraných parametrech měniče a sítě. První model je paralelní aktivní filtr. Druhý model je hybridní filtr, je to kombinace aktivního a pasivního filtru. Pro sestavení modelů je nejdříve potřeba pochopit aktivní filtry a teorii okamžitých výkonů. Proto je první polovina práce teoretická. Je vysvětlen princip a funkce jednotlivých síťových filtrů a PQ teorie. Druhá polovina je praktická a zabývá se sestavením simulačních modelů s implementací PQ teorie a testováním sestavených modelů. Poznatky z práce jsou uvedeny v závěru a měly by být použity při realizaci skutečného aktivního filtru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aktivní síťové filtry, aktivní výkonové filtry, aktivní kompenzace, P-Q teorie, teorie okamžitých výkonů, simulace Matlab Simulink

BURDA, M. *Simulace aktivních filtrů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Katedra elektrotechnologie, 2016. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Karel Künzel, CSc.

ABSTRACT

This Bachelor's thesis is dealing with the concept of Active Power Filters. Active power filters are most commonly used for harmonics dumping. The method used in this work is based on P-Q theory, that is, the theory of instantaneous power. Apart from filtering harmonics it allows reactive power compensation and voltage fluctuation mitigation. There are two simulation models of active power filters created in Matlab Simulink environment which are tested with different system configurations. The first model is parallel active filter and the second one is a hybrid filter, which is a combination of active and passive one. In order to assemble the simulation model, it is inessential to understand active filters and the theory of instantaneous power at first. This is the reason why half of the work is theoretical. The second half is practical and is dealing with the assembly of simulation models with implementation of P-Q theory and the testing of these models. The findings of this work are introduced and assessed at the end of the work and should assist while creating a real active filter.

KEYWORDS

Activepowerfilters, activecompensation, P-Q theory, InstantaneousPowerTheory, Matlab-Simulinksimulation

BURDA, M. *Activefilterssimulation*. Prague: Czech technical university in Prague, Facultyofelectricalengineering. Department ofelectrotechnology, 2016.
Bachelor's thesis. Supervisor: Ing. Karel Künzel, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Simulace aktivních síťových filtrů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a jeho kolegy Ing. Michala Brejchy, PhD., s použitím jejich rad a odborné literatury a jiných zdrojů, které jsem si vyhledal. Všechny zdroje jsou uvedeny na konci práce v seznamu literatury a citovány v průběhu.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Praze dne

.....

Michal Burda

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Karlovi Künzelovi, CSc. a jeho kolegovi Ing. Michalu Brejchovi, PhD za veškerou jejich výpomoc a systematické vedení mé práce. Jmenovitě panu Ing. Karlovi Künzelovi, CSc. za poskytnutí veškeré odborné literatury, pomoci při výběru práce a velmi dobrém nasměrování do problematiky aktivního filtrování. Panu Ing. Michalu Brejchovi, PhD děkuji za všechny intenzivní konzultace a rady, které mi poskytl. Bez jeho pomoci by se mi simulační model skládal velmi těžko. Dále chci poděkovat své přítelkyni, která mi neustále zajišťuje psychickou pohodu a nesmírně mi ulehčuje studium a všechny vypjaté momenty kolem toho. V neposlední řadě chci zmínit svou rodinu, která mě podporuje při studiu. I v dnešní době to není samozřejmostí a za to jim moc děkuji.

V Praze dne

.....

Michal Burda

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| Seznam obrázků | x |
| Seznam tabulek | xi |
| Seznam symbolů, veličin a zkratk | 1 |
| Úvod | 2 |
| 1 Cíle práce | 3 |
| 1.1 Teoretická část (Kapitola 2 - 3)..... | 3 |
| 1.2 Praktická část (Kapitola 4 - 5)..... | 3 |
| 2 Síťové filtry | 4 |
| 2.1 Pasivní filtry..... | 6 |
| 2.2 Aktivní filtry..... | 8 |
| 2.2.1 Paralelní aktivní filtr..... | 9 |
| 2.2.2 Sériové aktivní filtry..... | 10 |
| 2.2.3 Výkonová část aktivního filtru..... | 10 |
| 2.3 Hybridní filtry..... | 12 |
| 2.3.1 Zapojení hybridního filtru..... | 12 |
| 2.3.2 Princip hybridního filtru..... | 13 |
| 3 P-Q teorie | 15 |
| 3.1 Výpočet okamžitého výkonu..... | 16 |
| 3.2 Výpočet kompenzačních proudů..... | 17 |
| 3.3 Řídící algoritmus..... | 18 |
| 4 Sestavení modelů | 20 |
| 4.1 Definice nelineární zátěže..... | 20 |
| 4.2 Napájecí napětí a vliv impedance sítě..... | 21 |
| 4.3 Clarkové transformace..... | 22 |
| 4.4 Výpočet okamžitého výkonu..... | 22 |
| 4.5 Určení střídavé složky výkonu..... | 23 |
| 4.6 Dobíjení kondenzátoru..... | 24 |
| 4.7 Výpočet kompenzačních proudů..... | 26 |
| 4.8 Simulace PWM (resp. převod proudu na napětí)..... | 26 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.9 | Vazební indukčnost..... | 27 |
| 4.10 | Proud sítě..... | 27 |
| 4.11 | Úprava modelu na hybridní filtr..... | 28 |
| 5 | Výsledky testování simulace | 30 |
| | Proudy v síti bez připojených AKF a HF | 30 |
| | Proudy v síti po připojení AKF a HF | 31 |
| 5.1 | Vliv impedance sítě | 33 |
| 5.2 | Výstup měniče..... | 34 |
| 5.3 | Vliv PI regulátoru u AKF | 37 |
| | Dobíjení kondenzátoru | 37 |
| | Vynechání filtru dolní propust | 40 |
| | Závěr | 41 |
| | Literatura | 42 |
| | Seznam příloh | 43 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Zjednodušený pasivní filtr (Převzato z [3].)..... | 6 |
| Obrázek 2: Základní princip paralelního aktivního filtru. (Převzato z [6].)..... | 8 |
| Obrázek 3: Zjednodušené jednofázové zapojení aktivního filtru (Převzato z [6].) | 8 |
| Obrázek 4: Paralelní aktivní filtr (Převzato z [3].)..... | 9 |
| Obrázek 5: Sériový aktivní filtr (Převzato z [3].)..... | 10 |
| Obrázek 6: Paralelní aktivní filtr s napěťovým zdrojem (Převzato z [6].)..... | 11 |
| Obrázek 7: Paralelní aktivní filtr s proudovým zdrojem. (Převzato z [6].) | 11 |
| Obrázek 8: Jednofázové zapojení hybridního filtru (Převzato z [4].) | 12 |
| Obrázek 9: Zjednodušené jednofázové zapojení | 13 |
| Obrázek 10: Ekvivalentní zapojení pro proud zátěže | 14 |
| Obrázek 11 Řídící algoritmus paralelního aktivního filtru | 18 |
| Obrázek 12: Definice nelineární zátěže | 20 |
| Obrázek 13: Odebírané proudy nelineární zátěží | 21 |
| Obrázek 14: Vliv impedance sítě | 21 |
| Obrázek 15: Clarkové transformace | 22 |
| Obrázek 16: Výpočet okamžitého výkonu..... | 22 |
| Obrázek 17: Vizualizace okamžitého výkonu..... | 23 |
| Obrázek 18: Frekvenční charakteristika navrhnutého filtru | 23 |
| Obrázek 19: Výpočet napětí na kondenzátoru | 24 |
| Obrázek 20: PI regulátor | 25 |
| Obrázek 21: Dobíjení kondenzátoru | 25 |
| Obrázek 22: Výpočet kompenzačních proudů v rovině α , β | 26 |
| Obrázek 23: Převod požadovaného proudu na výstupní napětí měniče | 26 |
| Obrázek 24: Simulace vazební indukčnosti | 27 |
| Obrázek 25: Výpočet proudů v síti..... | 27 |
| Obrázek 26: Vazební člen hybridního filtru | 28 |
| Obrázek 27: Frekvenční charakteristika filtru typu horní propust | 29 |
| Obrázek 28: Proud hybridního filtru | 29 |
| Obrázek 29: Proud v síti bez připojeného AKF | 30 |
| Obrázek 30: Proud v síti bez připojeného HF (pouze pasivní filtr)..... | 31 |
| Obrázek 31 Proud v síti s připojeným AKF | 31 |
| Obrázek 32: Proud v síti s připojeným HF | 32 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 33: AKF - Okamžitý výkon přenášený ze sítě do systému | 32 |
| Obrázek 34: HF - Okamžitý výkon přenášený ze sítě do systému | 33 |
| Obrázek 35: Vliv impedance sítě AKF | 33 |
| Obrázek 36: Vliv impedance sítě HF | 34 |
| Obrázek 37: Proudů v síti - AKF, $K_i = 10$ | 35 |
| Obrázek 38: Proudů v síti - AKF, $K_i = 10000$ | 35 |
| Obrázek 39: Proudů v síti - HF, Gain = 10 | 36 |
| Obrázek 40: Proudů v síti - HF, Gain = 1000 | 36 |
| Obrázek 41: Napětí na kondenzátoru při $P = 10$ | 37 |
| Obrázek 42: Napětí na kondenzátoru při $P = 100$ | 37 |
| Obrázek 43: Proudů sítě při $P = 100$ - v pořádku | 38 |
| Obrázek 44: Napětí na kondenzátoru při $P = 1000$ | 38 |
| Obrázek 45: Proudů sítě při $P = 1000$ - horší kompenzace | 38 |
| Obrázek 46: : Napětí na kondenzátoru při příliš vysokém P - kmitání měniče | 39 |
| Obrázek 47: Proudů sítě při příliš vysokém P - kmitání měniče | 39 |
| Obrázek 48: Proudů v síti při kompenzování - bez filtru dolní propust | 40 |
| Obrázek 49: Okamžitý výkon dodávaný ze sítě do systému - bez filtru dolní propust .. | 40 |
| Obrázek 50: Kompenzační proudy AKF | 47 |
| Obrázek 51: Kompenzační proudy HF | 47 |
| Obrázek 52: Kompenzační proudy při kmitání | 48 |
| Obrázek 53: Fázová napětí sítě | 48 |
| Obrázek 54: Fázové proudy v síti | 49 |
| Obrázek 55: Okamžitý výkon přenášený ze sítě do systému | 49 |

SEZNAM TABULEK

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | | |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|
| AKF | | Aktivní síťový filtr |
| HF | | Hybridní filtr |
| h | | Řád harmonické |
| THD | [-] | Total Harmonic Distortion |
| I | [A] | Proud |
| U | [V] | Napětí |
| Z | [Ω] | Impedance |
| R | [Ω] | Odpor |
| L | [H] | Indukčnost |
| C | [F] | Kapacita |
| X _L | [Ω] | Induktivní reaktance |
| X _C | [Ω] | Kapacitní reaktance |
| f | [Hz] | Frekvence |
| ω | [rad.s ⁻¹] | Úhlová frekvence |
| K | [Ω] | Aktivní impedance filtru |
| p | [W] | reálná část okamžitého výkonu |
| q | [W] | imaginární část okamžitého výkonu |

ÚVOD

Poprvé jsem se s aktivními filtry setkal při studiu výkonové elektroniky. Ve skriptech jsem se toho moc nedočel, a tak jsem hledal informace všude možné. Nejčastěji jsem se setkával s reklamními a jinými propagačními materiály různých firem. Jednu reklamu si pamatuji do dnes. Byla zaměřená na aktivní filtr, který selektivně filtroval harmonické. Osoba v reklamě si po Fourierově rozvoji vybírala harmonické a ty následně v síti aktivní filtr kompenzoval. V důsledku toho se napravovala deformace napájecího napětí.

Tehdy jsem tomu moc nerozuměl, přesto to na mě působilo velice pozitivním dojmem a následně se aktivní filtry staly mojí hlavní prioritou při výběru bakalářské práce. Jsem moc rád, že na katedře elektrotechnologie ČVUT FEL aktivní filtry dlouhou dobu zkoumají a poskytli mi příležitost zabývat se jimi také. Pro realizaci skutečného aktivního filtru je potřeba široký záběr znalostí z elektrotechniky, měřicí a řídicí techniky. V bakalářské etapě by pro mě bylo možná až příliš náročné realizovat něco tak komplexního. Po dohodě s vedoucím práce a jeho kolegou Ing. Michalem Brejchou, PhD., byla zvolena simulace. Tato práce vznikala ve spolupráci s katedrou elektrotechnologie a mým dvousemestrálním zkoumáním.

Aktivní síťové resp. výkonové filtry se většinou používají pro filtrování harmonických a v zásadě jde vždy o paralelně nebo sériově připojený měnič (střídač napětového nebo proudového typu) a řízení tohoto měniče tak, aby odebíral stejné harmonické, jako odebírá nelineární zátěž, ale s opačnou fází. Nejnáročnější část tohoto filtru je jeho řízení. Jedné metodě řízení, jejímu principu a implementaci se věnuje bakalářská práce.

Metoda řízení aktivního filtru použita v práci se podstatně liší od výše uvedené. Nedovoluje selektivně kompenzovat harmonické, ale za to je naprosto univerzální a kromě toho, že filtruje od určité zlomové frekvence všechny harmonické, tak dokáže kompenzovat i jalový výkon a kolísání základní složky napětí. Princip metody řízení je založen na P-Q teorii. P-Q teorie neboli teorie okamžitých výkonů je aplikovatelná pouze na třífázovou síť s nulovým nebo bez nulového vodiče. V práci je uvažováno pouze třífázové zapojení bez nulového vodiče, kdy v síti nevznikají soufázové složky harmonických.

Nejdříve zde bude vysvětlen princip a funkce jednotlivých síťových filtrů a P-Q teorie. Poté jsou navrženy dva simulační modely. Jeden model bude paralelní aktivní filtr. Druhý model bude hybridní filtr. Funkce filtrů budou ověřeny, testovány a porovnány.

V samostatné kapitole "Cíle práce" jsou uvedeny požadavky na výsledek práce. V závěru je zhodnocení celé práce a jak se počáteční cíle podařilo naplnit.

1 CÍLE PRÁCE

V této fázi studia jde o základní pochopení principu, funkce a jistých omezení aktivních filtrů. Nabyté znalosti by měly napomáhat při realizaci skutečného aktivního filtru.

Hlavním cílem je realizovat aktivní filtrování v simulaci. Proto je potřeba nastudovat princip a metodu řízení a dále mít elementární znalosti z Matlab Simulinku. Práce se dá rozdělit na teoretickou a praktickou část.

1.1 Teoretická část (Kapitola 2 - 3)

Bude vysvětlena funkce a princip jednotlivých filtrů, P-Q teorie pro třífázové zapojení bez středního vodiče a bude navržen řídicí algoritmus pro paralelní aktivní a hybridní filtr.

1.2 Praktická část (Kapitola 4 - 5)

Budou vytvořeny dva simulační modely aktivních filtrů. První model bude paralelní aktivní filtr a měl by respektovat určité reálné vlastnosti celého systému. Druhý model bude hybridní filtr. Jejich funkce by měla být ověřena a porovnána.

2 SÍŤOVÉ FILTRY

Funkce aktivních a pasivních filtrů je v zásadě stejná - filtrování vyšších harmonických v oblasti nelineární zátěže, aby se dále nedostávaly do sítě a nezpůsobovaly nežádoucí jevy. Mezi typické nežádoucí jevy patří úbytky napětí na impedancích sítě, neboli zkreslení průběhu napětí. Při indukčnosti L a odporu R sítě by za ideálně sinusových podmínek, kdy zátěž odebírá pouze základní složku proudu, platilo:

$$\Delta U = Z \cdot I = (R + \omega \cdot L) \cdot I \quad [V, \Omega, s^{-1}, H, A] \quad (1)$$

kde I - efektivní hodnota proudu [A]

Z - impedance sítě [Ω]

Pokud by zátěž odebírala harmonické proudy (pro zjednodušení pouze 5. a 7. harmonickou), platilo by:

$$\Delta U = Z \cdot I = (R + 1 \cdot \omega \cdot L) \cdot I_{h1} + (R + 5 \cdot \omega \cdot L) \cdot I_{h5} + (R + 7 \cdot \omega \cdot L) \cdot I_{h7} \\ [V, \Omega, s^{-1}, H, A] \quad (2)$$

kde I_{h1} základní složka proudu, ef. hodnota

I_{h5} 5. harmonická proudu, ef. hodnota

I_{h7} 7. harmonická proudu, ef. hodnota

Je tedy patrné, že úbytek napětí na impedancích sítě je silně frekvenčně závislý a dá se očekávat větší deformace napětí při vyšších řádech harmonických. Indukčnost sítě L zde hraje také podstatnou roli.

Problémů s harmonickými je více. Jeden z dalších zásadních problémů je sčítání soufázových složek ve středním vodiči. U základní složky proudu je v třífázové soustavě posunutí o 120° elektrických mezi jednotlivými fázemi. U harmonických to je $h \cdot 120^\circ$ (h - řád harmonické). Násobky třetí harmonické se tedy uzavírají přes střední vodič a dochází k jeho přetěžování. Pokud se jedná o zapojení bez středního vodiče, tak soufázové složky se nemají kde uzavřít a v soustavě se nevyskytnou. U harmonických 5. řádu a mnohých dalších dochází k prohození fází. To má za následek opačnou rotaci fázorů proudu a u některých spotřebičů to je silně nežádoucí (např. u indukčních motorů způsobují brzdny pulzační moment). [7]

Některé obecné definice tvrdí, že harmonické nekonají práci a že způsobují pouze nežádoucí zatěžování sítě. S tím by se dalo souhlasit, pokud by bylo uvažováno sinusové napájecí napětí. Většinou se tak pro zjednodušení uvažuje. To ale nereprezentuje skutečnou situaci, protože dnes už se sinusové napětí nevyskytuje téměř nikde. Síť obsahuje harmonická napětí. Vytváří se při harmonických proudu na impedancích sítě. V přírodě je dané, že proud ve fázi s napětím koná práci a nemůže tomu být jinak ani u vyšších harmonických. S výkony za nesinusových podmínek to je lehce zamotané a celosvětově uznávaná definice, která by nejlépe reprezentovala reálnou situaci, se stále vyvíjí. [1]

Výkonová interpretace vyšších harmonických tedy není snadná a nejčastěji se pro jejich popis používá míra celkové deformace proudu resp. napětí. Je to poměr harmonických vůči základní složce proudu (resp. napětí), nazývaný jako celkové harmonické zkreslení - THD (*Total Harmonic Distortion*).

Definice dle ČSN:

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100 = [-] \quad (3)$$

kde I_1 efektivní hodnota základní složky proudu [A]
 I celková efektivní hodnota proudu [A]

Zde ale nehodnotíme simulační model podle THD, sledujeme reálnou a imaginární část okamžitého výkonu a průběhy napětí a proudů v síti po kompenzaci. Pro splnění účelu téhle práce to úplně stačí.

Vyšší harmonické nejsou jediné, které způsobují deformaci napětí. V síti se můžou vyskytovat i mezi-harmonické a sub-harmonické a obecně tahle problematika spadá do oblasti nízkofrekvenčního rušení, šířené po vedení, definované do frekvenčního rozsahu 9 kHz. [7]

2.1 Pasivní filtry

Pro pochopení činnosti aktivního filtru není třeba chápat pasivní filtr, protože pracuje na úplně jiném principu. Pro pochopení hybridního filtru to už ale potřeba je, neboť hybridní filtr je kombinací filtru aktivního a pasivního.

Zde se využívá fyzikálního jevu sériové rezonance, kdy impedance rezonančního obvodu je při určité frekvenci nulová (ideálně). Rezonance nastává v okamžiku, kdy induktivní reaktance a kapacitní reaktance se rovnají, tedy:

$$X_L = X_C \quad (4)$$

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Po úpravě a dosazení za

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f:$$

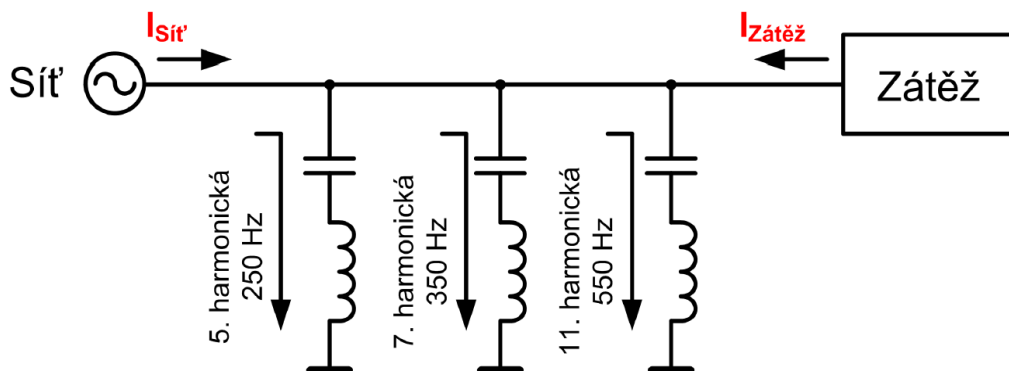
$$\omega^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ [Hz]} - \text{Thomsonův vztah} \quad (5)$$

Thomsonův vztah (5) slouží pro návrh rezonančního článku pasivního filtru. Rezananční článek má minimální impedanci při frekvenci f_0 a při návrhu na harmonickou proudů a připojení paralelně k síti se lze na něj dívat, jako na zkrat pro určitou harmonickou a vyfiltroval by ji ze sítě. Nutno podotknout, že nulová impedance nikdy nebude, protože jak cívka, tak kondenzátor mají parazitní vlastnosti, takže při rezonanci zůstane reálná část impedance. Je to věc, se kterou se při návrhu musí počítat a pro samotné zkoumání tohoto problému zde není prostor. [3]

Pasivní filtr je složen z několika takových článků, naladěných na vyšší harmonické frekvence, které chceme ze sítě odfiltrovat. Pro další zkoumání je zde zobrazeno zjednodušené jednofázové zapojení z [3]. Na každý článek se zde díváme jako na samostatný filtr.



Obrázek 1: Zjednodušený pasivní filtr (Převzato z [3].)

Proud ze zátěže zde má směr do sítě. Jde o znázornění, že harmonické proudy tečou zpátky do sítě. Pokud je před zátěží připojený pasivní filtr (rezonanční článek), tak se uzavřou přes filtr do země a nepronikají dále do sítě. Takhle by to bylo v

ideálním případě. Ve skutečnosti je ale filtrační charakteristika silně závislá na impedanci sítě a filtru:

$$I_{Sh} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_S} \cdot I_{Lh} \quad (6)$$

kde Z_F impedance sítě

Z_S impedance filtru

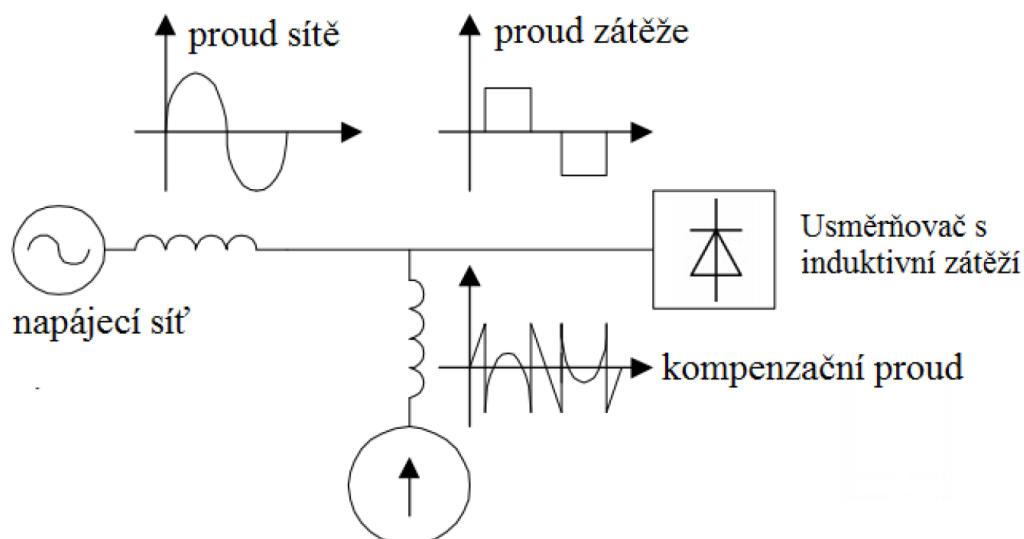
I_{Lh} h. harmonická proudu odebíraná zátěží

I_{Sh} h. harmonická proudu v síti po kompenzaci pasivním filtrem

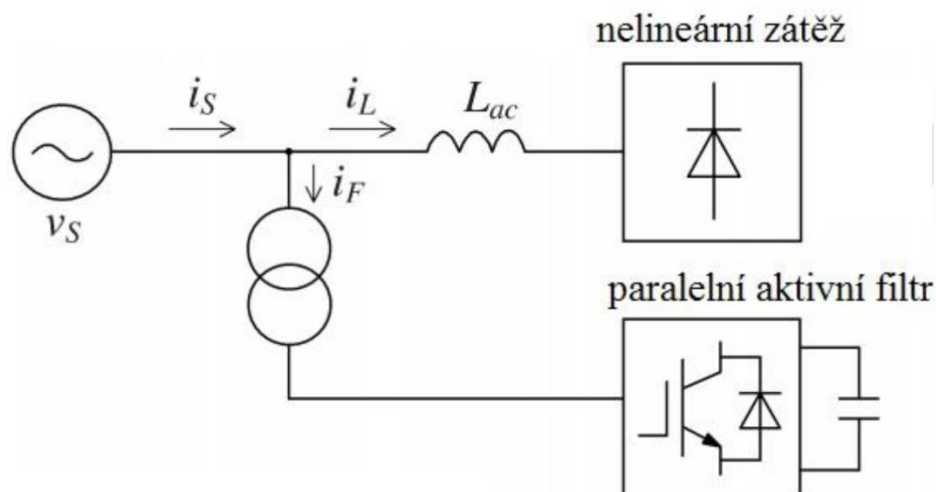
Ze vztahu (1.5) je patrné, že pro vyšší impedanci sítě bude pasivní filtr kompenzovat lépe. Problémů s pasivními filtry je více, může dojít např. k paralelní rezonanci mezi měničem a sítí. Filtrační charakteristika pasivního filtru se dá zlepšit sériově zapojeným aktivním filtrem, potom je takový systém označován jako hybridní filtr.

2.2 Aktivní filtry

Základní princip aktivního filtru (dále už jen AKF) je, že v místě nelineární zátěže je připojen výkonový měnič, který je řízen takovým způsobem, aby odebíral stejné vyšší harmonické, jako nelineární zátěž, ale s opačnou fází resp. amplitudou. Na měnič se můžeme dívat jako na zdroj vyšších harmonických, což znázorňuje následující obrázek. Pro zjednodušení je zde uvažována pouze jednofázové zapojení a paralelní AKF, kterému se práce věnuje nejvíc.



Obrázek 2: Základní princip paralelního aktivního filtru. (Převzato z [6].)



Obrázek 3: Zjednodušené jednofázové zapojení aktivního filtru (Převzato z [6].)

Z obrázků 2 a 3 plyne následující vztah:

$$I_S = I_{(AK)F} + I_L \quad (7)$$

Zátěž odebírá ze sítě pouze základní harmonickou proudů a zbytek je dodáván

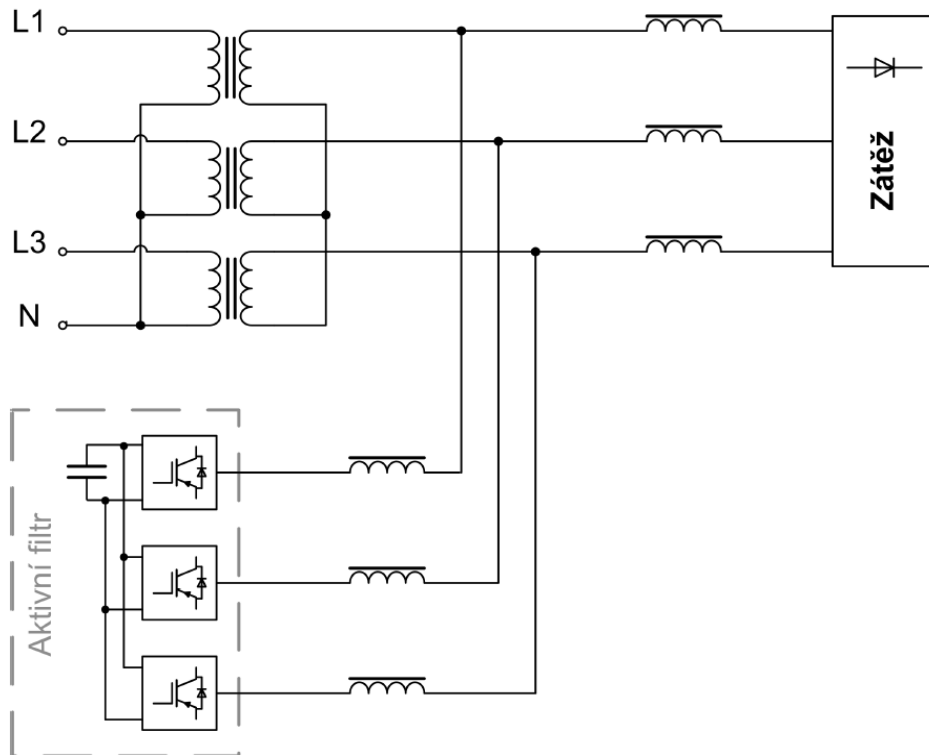
aktivním filtrem. AKF se tedy stává zdrojem vyšších harmonických pro danou zátěž.

AKF se dá zapojit i sériově pomocí vazebního transformátoru, potom se na něj můžeme dívat, jako na zdroj vyšších harmonických. Rozlišují se tedy dvě základní topologie - sériové a paralelní. Každá má své opodstatnění a je vhodnější na něco jiného.

V následující kapitole je představeno základní členění aktivních filtrů podle literatury [1].

2.2.1 Paralelní aktivní filtr

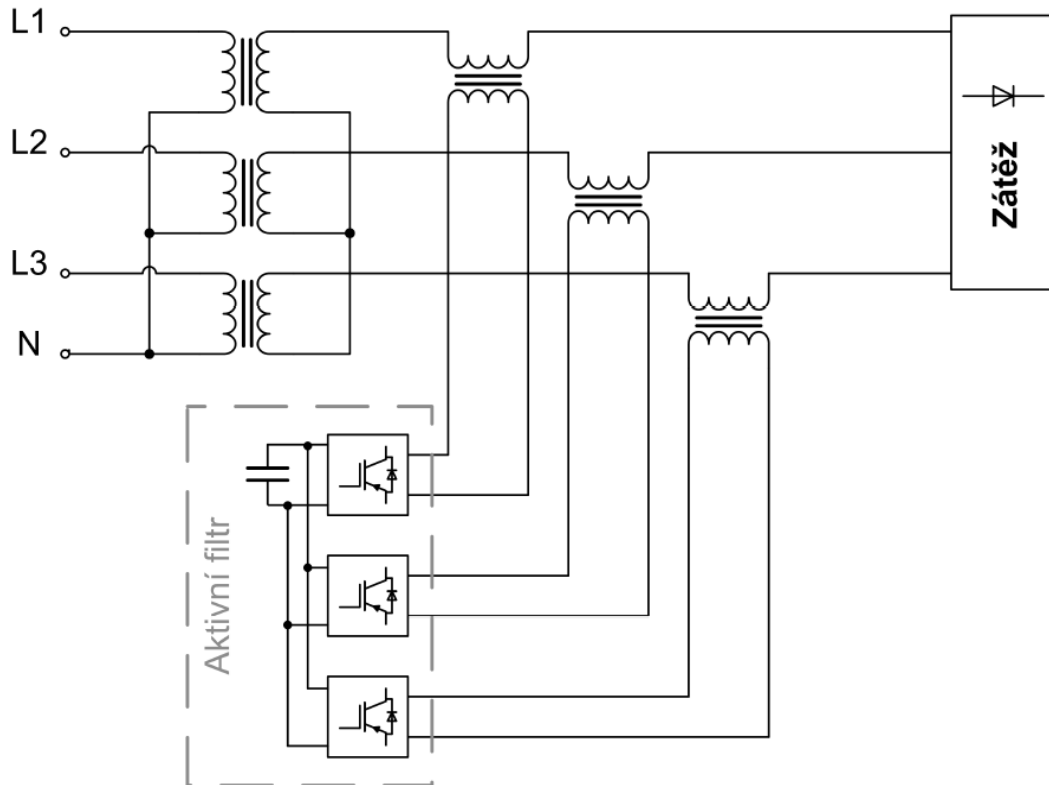
V [1] označovaný jako "*shunt active filter*". Je měnič zapojený podle obrázku níže. Tohle zapojení je ideální pro kompenzování harmonických proudů nelineární zátěže. Je vhodný aplikovat na nelineární zátěže induktivního charakteru (např. usměrňovače řízené/neřízené s induktivní zátěží). Dokáže kompenzovat i jalovou energii. [1]



Obrázek 4: Paralelní aktivní filtr (Převzato z [3].)

2.2.2 Sériové aktivní filtry

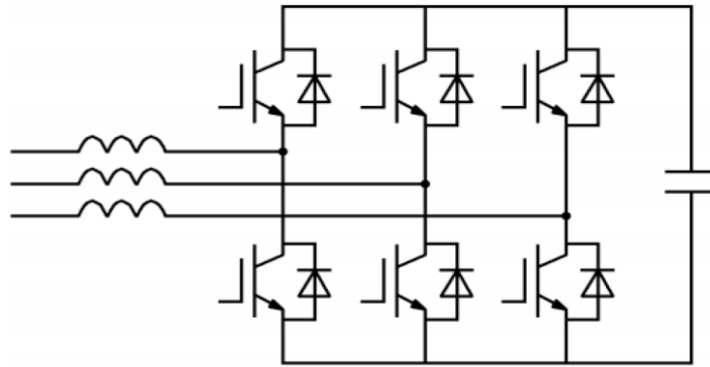
Sériový aktivní filtr v [1] označovaný jako "series active filter" je AKF zapojený podle obrázku 5. Vazební transformátor zde tvoří stejnosměrnou vazbu a chová se jako zdroj vyšších harmonických napětí, je tedy vhodný pro kompenzování deformovaného napětí kapacitní nelineární zátěží (např. usměrňovač s kapacitní zátěží). Navíc se s ním dá kompenzovat i kolísání základní harmonické složky napětí (sítě). Používá se také v kombinaci s pasivním filtrem, kdy vylepšuje jeho filtrační charakteristiku, o tom více v části o hybridních filtrech.



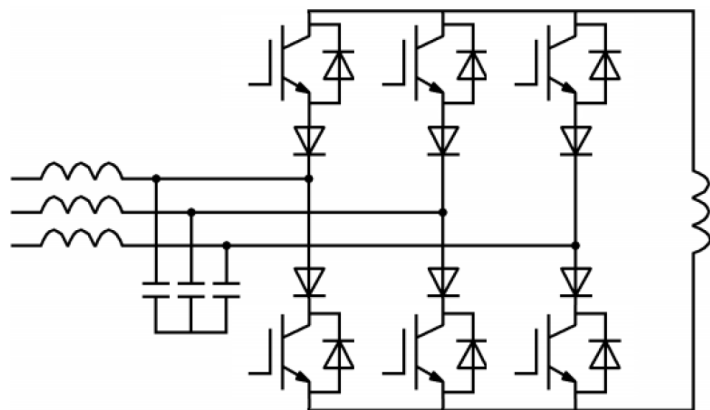
Obrázek 5: Sériový aktivní filtr (Převzato z [3].)

2.2.3 Výkonová část aktivního filtru

Výkonový měnič může mít jako akumulční prvek kondenzátor nebo cívku, dnes se prakticky u všech AKF používají střídače napětového typu (akumulční prvek kondenzátor). Může to být i střídač proudového typu (akumulční prvek cívka), ty se však z kompaktních a ekonomických důvodů nepoužívají [1]. V téhle práci je použit střídač napětového typu. Střídač také může být na každou fázi jeden nebo třífázový. Níže jsou uvedeny některé typy.



Obrázek 6: Paralelní aktivní filtr s napěťovým zdrojem (Převzato z [6].)



Obrázek 7: Paralelní aktivní filtr s proudovým zdrojem. (Převzato z [6].)

Na obrázku 5 jsou před střídačem cívky s kondenzátory. Ty se tam umísťují kvůli vysokofrekvenčnímu rušení z PWM. V obrázku 4 jsou pouze cívky, jejich účel je zamezit velkému di/dt .

PWM měniče ale musí "vědět", co mají spínat a jakým způsobem. To vše zajišťuje řídicí část filtru. Řídicí část se liší hlavně podle metody řízení, ale obecně se dělí na:

- 1) Metody řízení pracující v časové oblasti
- 2) Metody řízení pracující ve frekvenční oblasti

Řízení na principu P-Q teorie je metoda pracující v časové oblasti a bude představena v samostatné kapitole "P-Q teorie".

2.3 Hybridní filtry

Pasivní filtr má několik nevýhod:

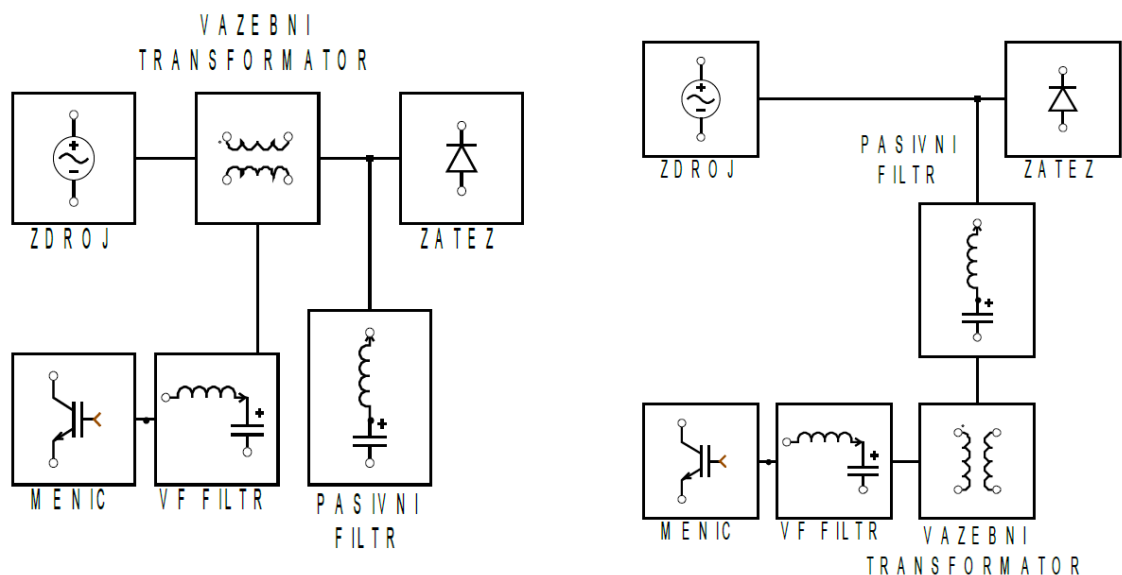
1. Impedance zdroje silně ovlivňuje filtrační schopnosti filtru.
2. Paralelní rezonance mezi zdrojem a pasivním filtrem způsobuje zesílení vyšších harmonických proudů na straně zdroje při určitých frekvencích.
3. Pasivní filtr může vpadnout do sériové rezonance se zdrojem tak, že zkreslené napětí způsobí nežádoucí nárůst harmonických proudů pasivního filtru.

[2]

Sériový aktivní filtr zde má funkci potlačení nevýhod a negativních vlivů pasivního filtru a jejich kombinace je označována jako hybridní filtr.

2.3.1 Zapojení hybridního filtru

Aktivní filtr se připojuje vazebnými transformátory buď před pasivní filtr nebo do uzlu pasivního filtru. Zjednodušené jednofázové zapojení je vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 8: Jednofázové zapojení hybridního filtru (Převzato z [4].)

Výhodou zapojení na pravé straně je, že základní složka proudu neprochází přes vazební transformátor.

2.3.2 Princip hybridního filtru

Pro vysvětlení principu je třeba se vrátit ke vztahu (6), který vychází ze zjednodušeného zapojení pasivního filtru mezi síť a zátěž:

$$I_{Sh} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_S} \cdot I_{Lh} \quad (6)$$

Pokud by byla impedance sítě hodně malá, skoro nulová, nebo pokud by

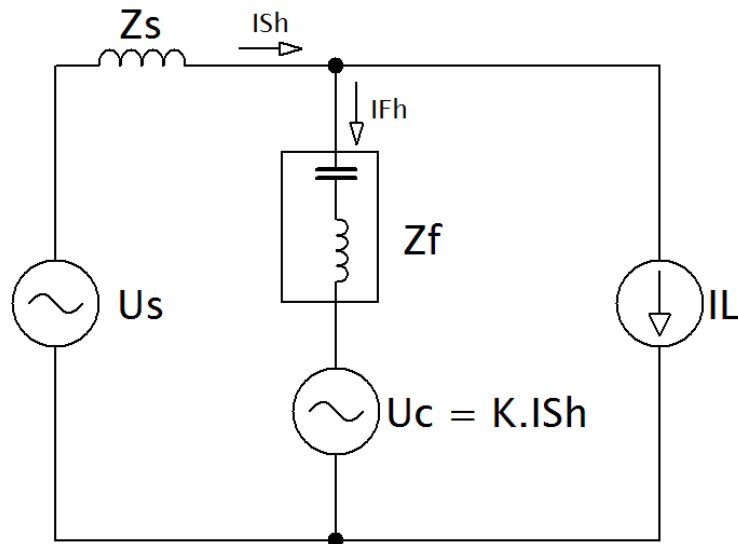
$|Z_F| \gg |Z_S|$, tak pasivní filtr by požadovanou filtrační charakteristiku neměl. Navíc při určitých frekvencích se vyskytují paralelní rezonance mezi Z_F a Z_S ($|Z_F + Z_S| = 0$), které zesilují harmonické a daleko větší množství by teklo do zdroje, než do zátěže. Když se připojí aktivní filtr a je řízený jako napěťový zdroj

$$U_C = K \cdot I_{Sh} \quad (7)$$

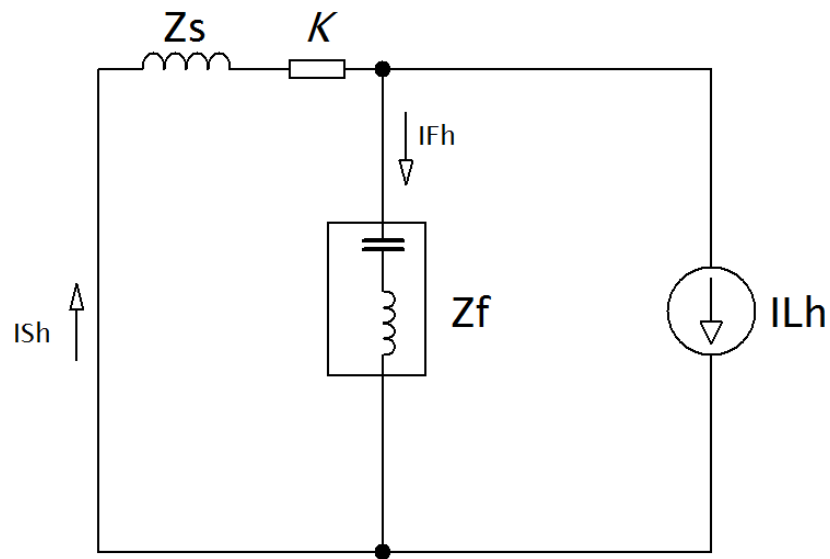
aktivní filtr přinutí všechny harmonické, které generuje zátěž, uzavřít se pasivním filtrem. [2]

U_C je kompenzační napětí filtru, K je aktivní impedance filtru.

V principu jde tedy o to, že AKF musí být řízen tak, aby injektované napětí do sítě bylo v proti fázi se zátěží generovanou harmonickou proudy. AKF se potom chová jako virtuální odpor pouze pro danou harmonickou a přinutí ji uzavřít se pasivním filtrem. Zároveň se tak chová i pro okruhové proudy paralelní rezonance, tlumí je. Z následujících obrázků je odvozena filtrační charakteristika hybridního filtru pro sinusové napájecí napětí.



Obrázek 9: Zjednodušené jednofázové zapojení



Obrázek 10: Ekvivalentní zapojení pro proud zátěže

Z toho vyplývá:

$$I_{Sh} = \frac{Z_F}{K + Z_S + Z_F} \cdot I_{Lh} \quad (8)$$

Pokud $K \gg |Z_F|$, harmonické proudy protékají pouze přes pasivní filtr.

Pokud $K \gg |Z_S|$, K dominuje filtrační charakteristiku a potlačuje paralelní rezonanci mezi Z_F a Z_S . [2]

3 P-Q TEORIE

Při analýze elektrických obvodů, výkonových obvodů, atd., se dá na problematiku pohlížet buď z frekvenční nebo z časové oblasti. Pokud se jedná o ustálené jevy, dlouhotrvající jevy, je výhodné řešit obvod ve frekvenční oblasti. Pokud se však jedná o přechodné stavy, krátké děje, musí se systém analyzovat v časové oblasti.

Klasická definice výkonů při sinusových podmínkách je už dlouhou dobu daná a využívána po celém světě a platí jak pro frekvenční, tak pro časovou oblast.

Při nesinusových podmínkách se ale jednotná definice stále vyvíjí. I když Budeamu poukazoval na tenhle problém už skoro před stoletím, nebylo potřeba se tím zabývat, protože byl tehdy zanedbatelný. Budeamu definoval výkonové poměry v jednofázovém systému ve frekvenční oblasti a výsledný výkon ve více fázových systémech superpozicí sečetl, jako příspěvek od jednotlivých fází. Asi o 50 let později definoval Fryze výkon za nesinusových podmínek v časové oblasti. Obě definice ale v určitých situacích vedou ke špatnému výkladu o fyzikální podstatě výkonu za nesinusových podmínek. [1]

Teorie okamžitých výkonů se dá interpretovat více způsoby, ale zásadní je, že definuje výkonové poměry v třífázové síti jako celek. Neřeší tedy superpozicí jednotlivé příspěvky od každé fáze. Výsledkem je přesná interpretace výkonu a jejich fyzikální podstaty za nesinusových podmínek v časové oblasti. Pro analýzu sítě, jako třífázového dynamického systému s neustálými změnami, to je ideální.

Principem metody je transformace okamžitých hodnot napětí a proudu se do dvou vektorů rotujících zpravidla v prostoru $\alpha, \beta, 0$. Napěťový i proudový vektor má tedy příčnou, podélnou a nulovou (netočivou složku). Vektory jsou pouze funkcí času, protože okamžité hodnoty proudu a napětí podléhají jen Clarkové transformaci. Transformace Clarkové je matematická operace, která převádí okamžité hodnoty z prostoru s fázovými osami a, b, c do prostoru vzájemně kolmých os. Z vektorů se potom dopočítává okamžitý komplexní výkon, který má svou reálnou a imaginární část. Jsou rozlišována dvě zapojení a to s nulovým vodičem nebo bez něj. V této práci je použito zapojení bez nulového vodiče, kdy nevzniká netočivá složka proudu a napětí a výpočet je jednodušší. Bude zde uveden postup jen pro toto zapojení.

3.1 Výpočet okamžitého výkonu

V zapojení bez nulového vodiče nevzniká netočivá složka, výsledné vektory tedy budou pouze v rovině α, β .

Pro převedení do roviny α, β se použije Clakové transformace, výpočet bude vypadat následovně:

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

Pro zachování invariance výkonů (neměnnosti při transformaci) se volí $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$.

Napětový vektor: $u = u_\alpha + ju_\beta$ (11)

Proudový vektor: $i = i_\alpha + ji_\beta$ (12)

Okamžitý komplexní výkon: $s = u \cdot i^* = (u_\alpha + ju_\beta) \cdot (i_\alpha - ji_\beta)$ (13)

Okamžitý komplexní výkon se po roznásobení dá rozložit na reálnou a imaginární část (p, q). Pomocí maticového výpočtu vypadá určení p, q následovně:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (14)$$

p - reálná část okamžitého výkonu, značí přenášenou energii mezi dvěma systémy

q - imaginární část okamžitého výkonu, nepodílí se na přenosu výkonu mezi dvěma systémy. Oproti jalovému výkonu, jeho střední hodnota není nulová, přesná interpretace v [1].

Z těchto složek okamžitého výkonu se vybírá, která část se bude kompenzovat.

3.2 Výpočet kompenzačních proudů

Z požadavků na filtrování se v P-Q teorii dopočítávají výkony v síti, které je potřeba kompenzovat. Ty se následně přepočítávají na kompenzační proudy.

Obecně k filtrování a kompenzování je zcela individuální přístup. Ne vždy je potřeba kompenzovat vše. Závisí to hlavně na zkratovém výkonu soustavy (tvrdosti sítě), úřadech, ale také na zkušenostech projektantů a jejich schopnostech danou věc řešit efektivně. Zkrátka bylo by značně neekonomické všechno kompenzovat aktivním filtrem. Proto jsou hybridní filtry výhodné. V této práci uvažujeme nelineární zátěž relativně malých proudů a u paralelního AKF je snaha o kompenzování všeho.

Reálná i imaginární složka okamžitého výkonu se dá rozložit na střední a střídavou složku:

$$p = \tilde{p} + \bar{p}$$

$$q = \tilde{q} + \bar{q}$$

Vyšší harmonické se v obou složkách projevují střídavě. Střední složka reálná by mohla odpovídat činnému výkonu v třífázové soustavě a střední složka imaginární jalovému výkonu.

Střídavá složka reálné části výkonu se dá určit dvěma způsoby:

$$1) \text{ Filtr dolní propust} \rightarrow \bar{p} \rightarrow \tilde{p} = p - \bar{p} \quad (15)$$

$$2) \text{ Filtr horní propust} \rightarrow \tilde{p} \quad (16)$$

Analogicky se dá rozložit i imaginární část q okamžitého výkonu.

Použitý filtr a jeho tlumení zde hraje podstatnou roli a ovlivňuje filtrační schopnosti celého aktivního filtru. Filtr navíc tlumí až od určité zlomové frekvence. To je ovšem dáno konkrétními požadavky na kompenzaci.

Za předpokladu, že by paralelní AKF měl kompenzovat i jalový výkon, tak by se kompenzovala celá imaginární část q a střídavá složka reálného \tilde{p} . Do výpočtu kompenzačních proudů se musí započítat i dobíjení kondenzátoru, to se u paralelního AKF projeví v reálné složce okamžitého výkonu a celý výpočet vypadá následovně [1]:

$$\begin{pmatrix} i_{C\alpha}^* \\ i_{C\beta}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\tilde{p} + p_{\text{loss}} \\ -q \end{pmatrix} \quad (17)$$

Hybridní filtr by kompenzoval pouze \tilde{p} a \tilde{q} . a zároveň se kvůli LC vazbě dobíjení kondenzátoru projeví v imaginární části okamžitého výkonu.

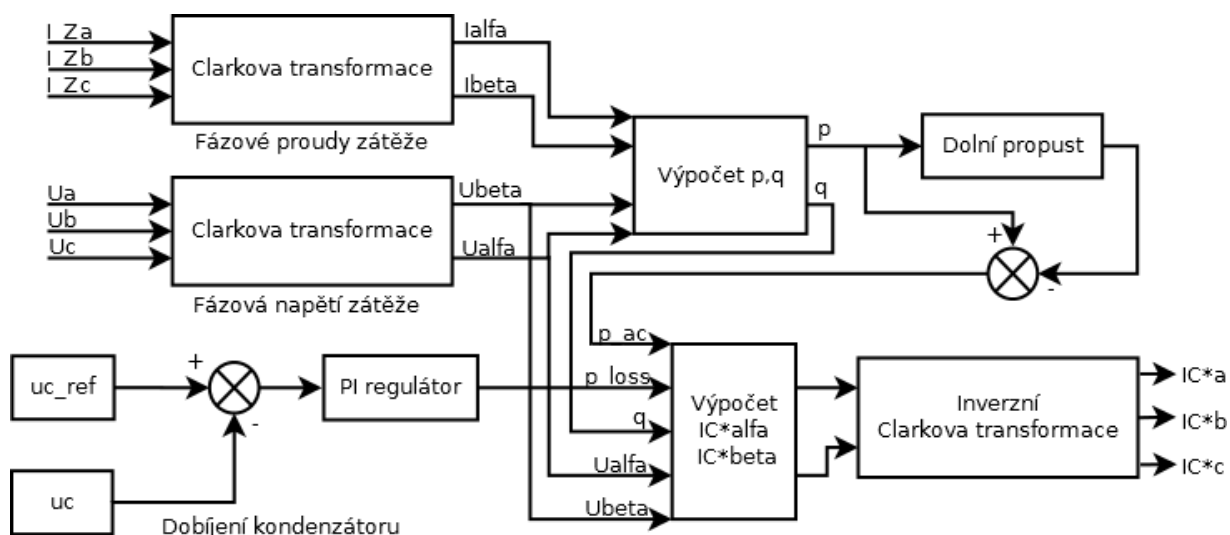
$$\begin{pmatrix} i_{C\alpha}^* \\ i_{C\beta}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\tilde{p} \\ -\tilde{q} + q_{\text{loss}} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Inverzní Clarkova transformace:

$$\begin{pmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{C\alpha}^* \\ i_{C\beta}^* \end{pmatrix} \quad (19)$$

3.3 Řídicí algoritmus

Řídicí algoritmus v souladu s [1] pro paralelní aktivní filtr je na následujícím obrázku:



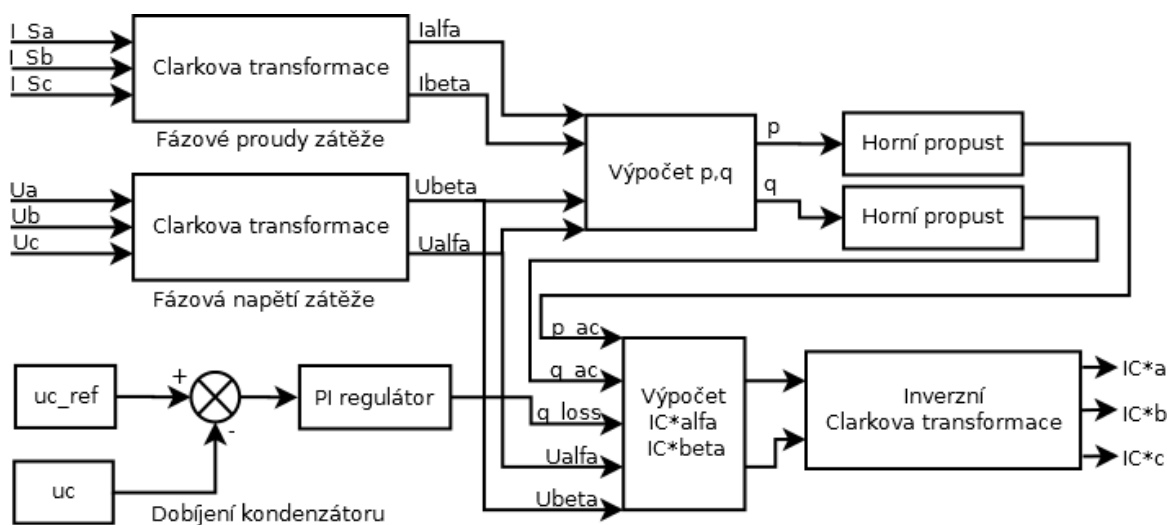
Obrázek 11 Řídicí algoritmus paralelního aktivního filtru

- I_{Za}, I_{Zb}, I_{Zc} Fázové proudy zátěže
- U_a, U_b, U_c Fázová napětí sítě v místě připojení aktivního filtru

Požadované proudy už jsou vstupy pro PWM řízení - zde se požadovaný proud převádí na napětí měniče, porovnává s trojúhelníkovým průběhem 20 kHz v komparátoru a realizuje se spínání.

V této práci není spínání realizováno, výstupem z měniče bude spojitá hodnota napětí. Na vazebních prvních se potom bude dopočítávat skutečný proud měniče a ten bude porovnáván s požadovanou hodnotou.

Řídicí algoritmus v souladu s [2] pro hybridní filtr:



I_{Sa} , I_{Sb} , I_{Sc} Fázové proudy zdroje

U_a , U_b , U_c Fázová napětí sítě v místě připojení aktivního filtru

Proudy se dále musí převést na požadovaná kompenzační napětí filtru podle vztahu (7):

$$U_k^* = K \cdot I_C$$

Požadované výstupní napětí měniče by se realizovalo obdobně, jako u paralelního AKF - pulsně šířkovou modulací. Vstupem do PWM řízení by ale nebyly požadované proudy, ale přímo kompenzační napětí určené předešlým vztahem.

4 SESTAVENÍ MODELŮ

Záměr je implementovat řídicí algoritmy z 3.3. Simulace probíhala v prostředí Matlab Simulink. Je definovaná nelineární zátěží v zapojení bez nulového vodiče. Modely budou respektovat vliv impedance sítě a vliv vazebních členů.

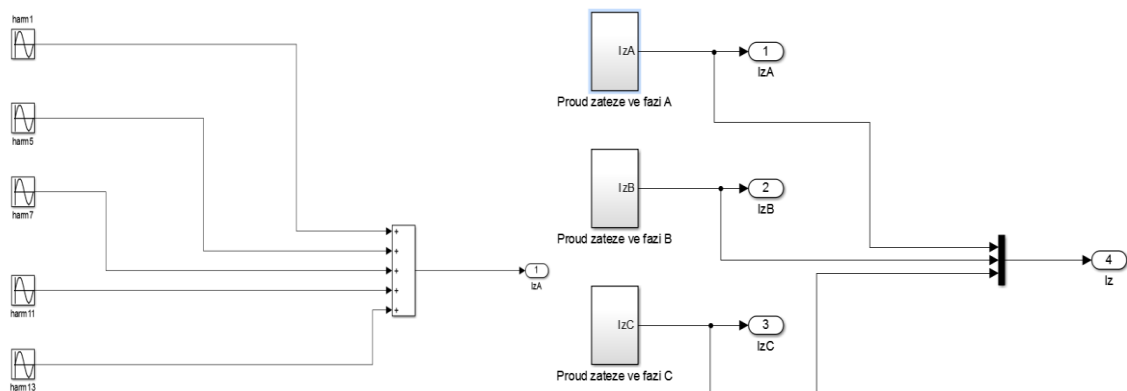
4.1 Definice nelineární zátěže

Bude zde podrobně popsán průběh sestavení modelu paralelního AKF a ten bude potom předělán na hybridní. Ve výsledku jsou tedy dva simulační modely. Paralelnímu aktivnímu filtru je zde věnována větší pozornost a pro něj je realizován i vliv dobíjení kondenzátoru.

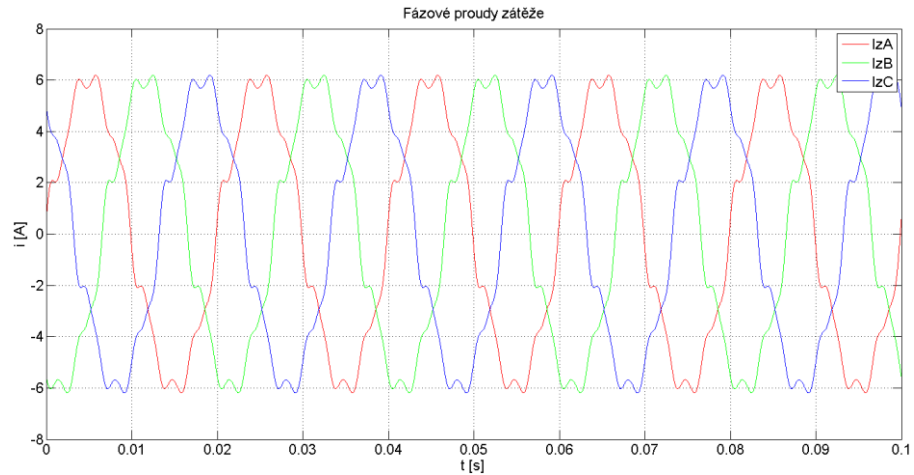
V zapojení bez nulového vodiče nevznikají násobky 3. harmonické proudu, proto se nedefinují. Výsledný proud nelineární zátěže je součet všech harmonických. Pro ilustraci je zde ukázána pouze základní a 5. harmonická. Ve skutečnosti je nadefinována i 7., 9., 11. a 13. harmonická.

```
% Zakladniharmonicka proudu
harm(1).I = 6; % [A] Amplituda proudu (Maximalniokamzita hodnota)
harm(1).fi = 0; % [rad] Fazovy posun
harm(1).f = 50; % [Hz] Frekvencezakladniharmonicke proudu
harm(1).phB = 4*pi/3; % [rad] Posun faze v B vuci A
harm(1).phC = 2*pi/3; % [rad] Posun faze v C vuci A

% 5. harmonicka proudu
harm(5).I = 0.3;
harm(5).fi = 0.2*pi;
harm(5).f = 5*harm(1).f;
harm(5).phB = 5 * harm(1).phB;
harm(5).phC = 5 * harm(1).phC;
```



Obrázek 12: Definice nelineární zátěže



Obrázek 13: Odebrané proudy nelineární zátěží

4.2 Napájecí napětí a vliv impedance sítě

Napětí zdroje je definováno obdobně:

```
Usit = 325; % [V] Amplituda napeti (Maximalniokamzita hodnota)
% Odpovidaefektivnihodnote 230 [V]
frekvence = 50; % [Hz]
```

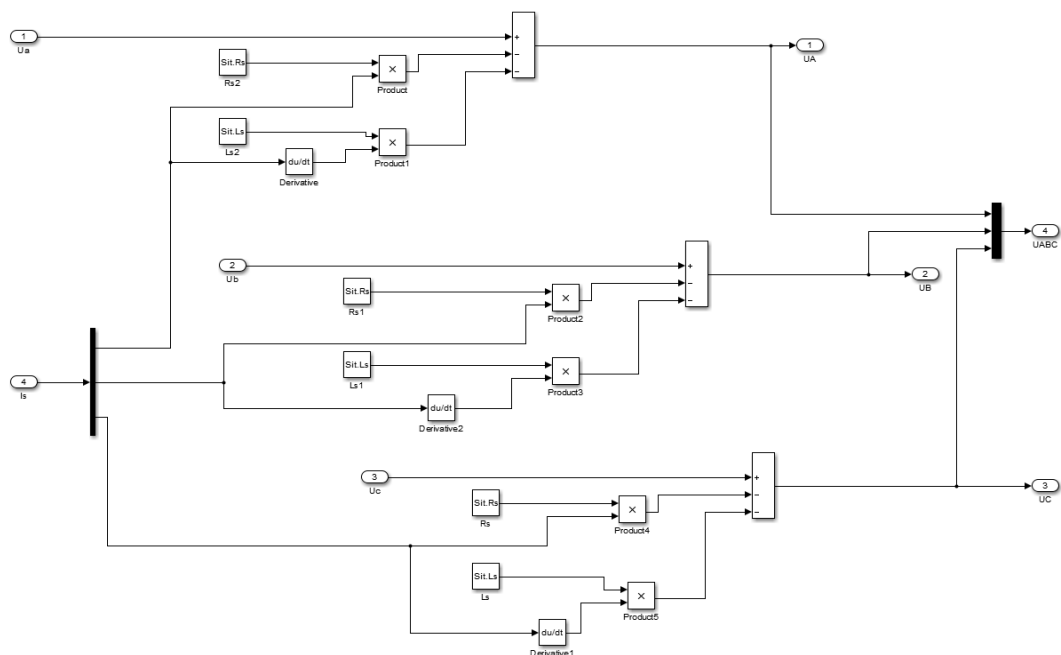
Pro vliv impedance sítě se musí napětí poupravit podle následující rovnice:

$$U = Usit - Sit.Rs \cdot Is - s \cdot Sit.Ls \cdot Is \quad (20)$$

Is je proud v síti, je dopočítáván jako součet proudů zátěže a aktivního filtru.

$Sit.Rs$, $Sit.Ls$ je odpor a indukčnost sítě a jsou definovány ve skriptu.

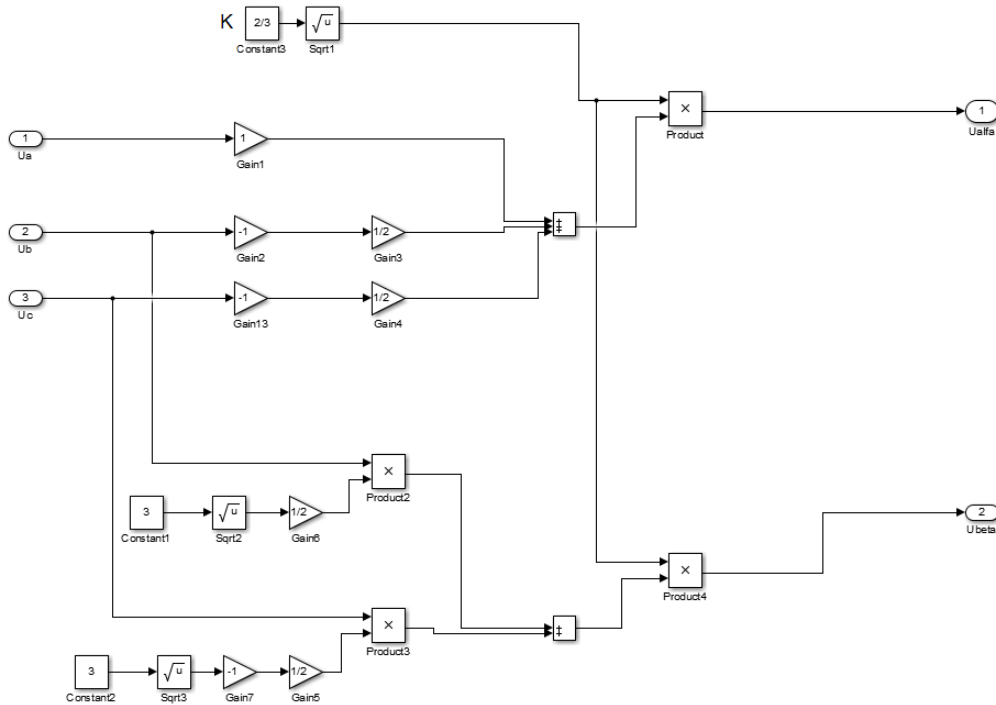
Následuje implementace:



Obrázek 14: Vliv impedance sítě

4.3 Clarkové transformace

Napětí sítě se převádí v bloku Clarkové transformace - vztah (9):

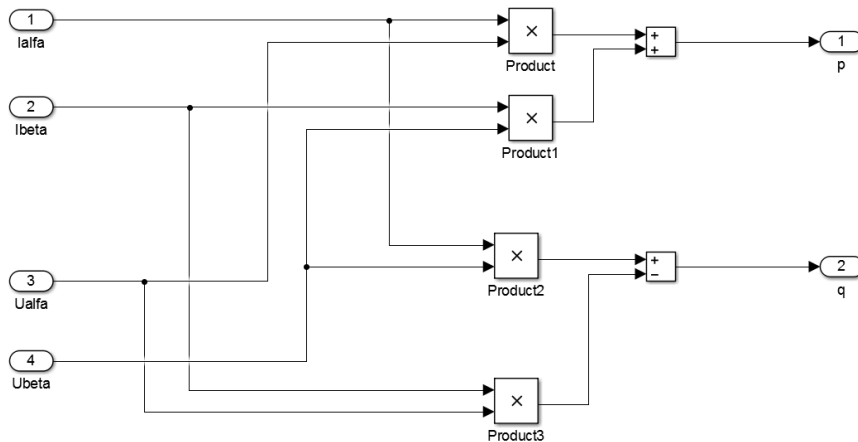


Obrázek 15: Clarkové transformace

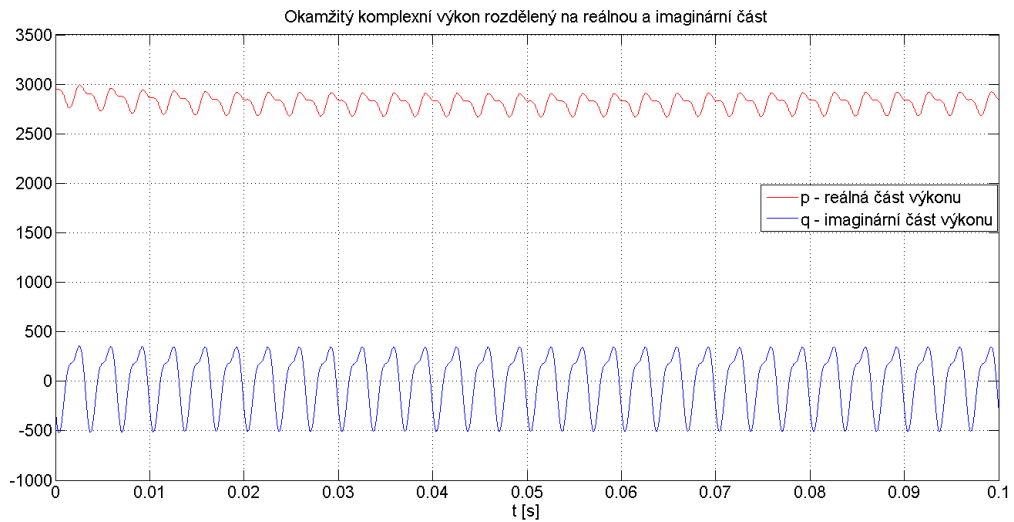
Analogicky se i proud zátěže převede do roviny α, β .

4.4 Výpočet okamžitého výkonu

Výpočet reálné a imaginární části okamžitého výkonu a jeho vizualizace v Matlabu - rovnice (14):



Obrázek 16: Výpočet okamžitého výkonu



Obrázek 17: Vizualizace okamžitého výkonu

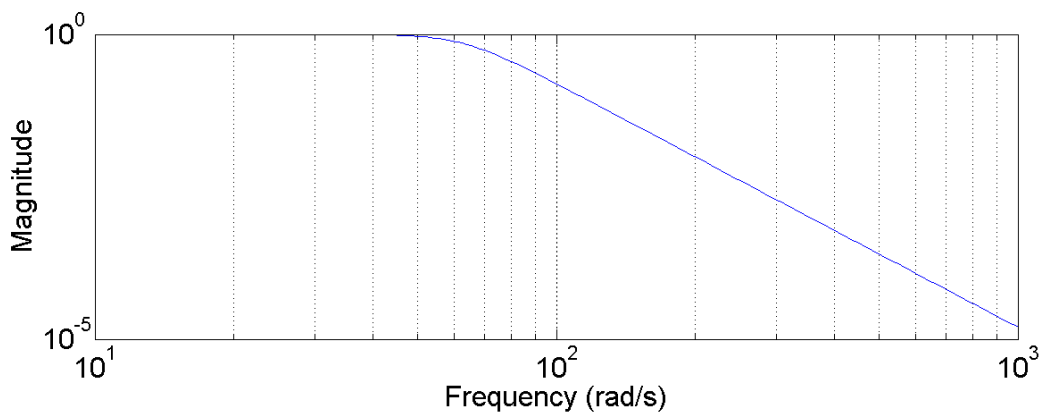
4.5 Určení střídavé složky výkonu

Pro určení střídavé složky je u paralelního AKF použit vztah (15).

Dolní propust je navržena Butherworthovou aproximací. K tomu slouží funkce `buttap` v Matlabu. Je vytvořen prototyp filtru a poté normalizován na potřebný zlomový kmitočet (funkce `buttap` -> `zp2tf` -> `lp2lp` - je uvedeno v příloze). Řád i zlomová frekvence se zadává ze skriptu:

```
filtrAvg.f0 = 10;           %mezni frekvence filtru [Hz]
filtrAvg.N = 4;           %rad filtru
filtrAvg.w0 = 2*pi*filtrAvg.f0; %zlomovauhlova frekvence filtru
```

Správná funkce filtru je ověřena frekvenční charakteristikou (funkce `freqs`):



Obrázek 18: Frekvenční charakteristika navrhnutého filtru

Filtr je navrhnut správně, má zlom -3dB na frekvenci `filtrAvg.w0` (kolem 60 rad/s pro tento případ). Výstupem z filtru bude střední hodnota p a střídavá složka se tedy určí podle vztahu (15).

4.6 Dobíjení kondenzátoru

Dobíjení kondenzátorem se zde realizuje PI regulátorem. Odchylka od požadovaného napětí je vstupem do PI regulátoru a výstupem je výkon p_{loss} , který je třeba dodávat do kondenzátoru a projeví se ve výpočtu kompenzačních proudů. Požadované napětí, kapacita kondenzátoru, proporcionalní i integrální konstanty jsou zadávány ze skriptu:

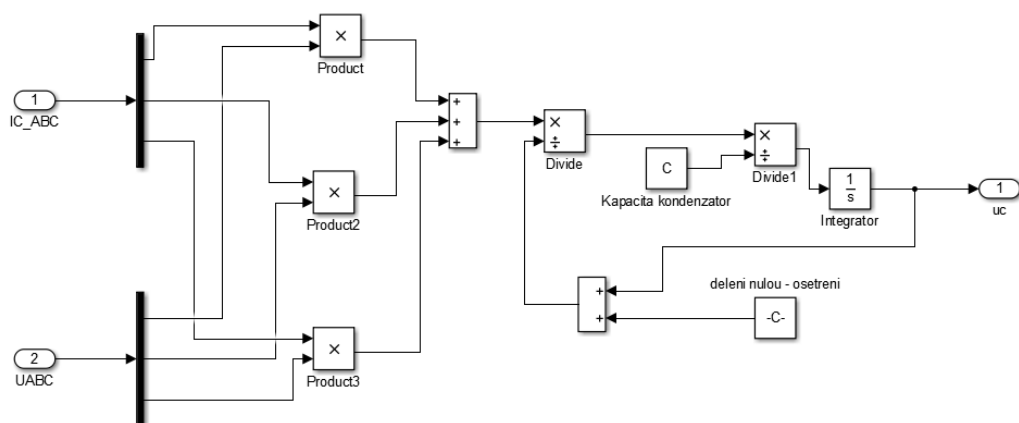
```
C = 0.001 ; % [F] kapacitakondenzatoru
uc_poz = 600; % [V] napeti nakondenzatoru
P = 100; % proporcionalnizesileni
I = 10; % integracnizesileni
```

Je třeba vypočítat napětí na kondenzátoru. Pro okamžitý výkon dodávaný do kondenzátoru platí:

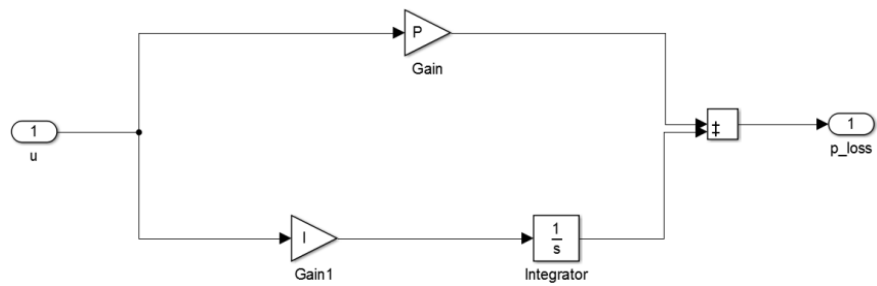
$$u_{s1} \cdot i_{f1} + u_{s2} \cdot i_{f2} + u_{s3} \cdot i_{f3} = u_c \cdot i_c = i_c \cdot i_c / (sC) \quad (21)$$

kde u_{s1-s3} fázová napětí sítě
 i_{f1-f3} proudy aktivního filtru (v této fázi zatím nejsou známy, jsou to skutečné proudy měniče, které jsou vypočteny na vazební indukčnosti AKF)
 u_c napětí kondenzátoru
 i_c proud kondenzátoru

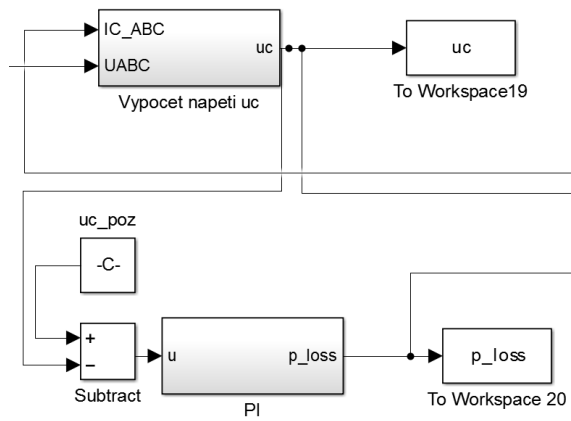
$$\text{Po úpravě: } u_c = \frac{u_{s1} \cdot i_{f1} + u_{s2} \cdot i_{f2} + u_{s3} \cdot i_{f3}}{(u_c \cdot sC)} \quad (22)$$



Obrázek 19: Výpočet napětí na kondenzátoru



Obrázek 20: PI regulátor

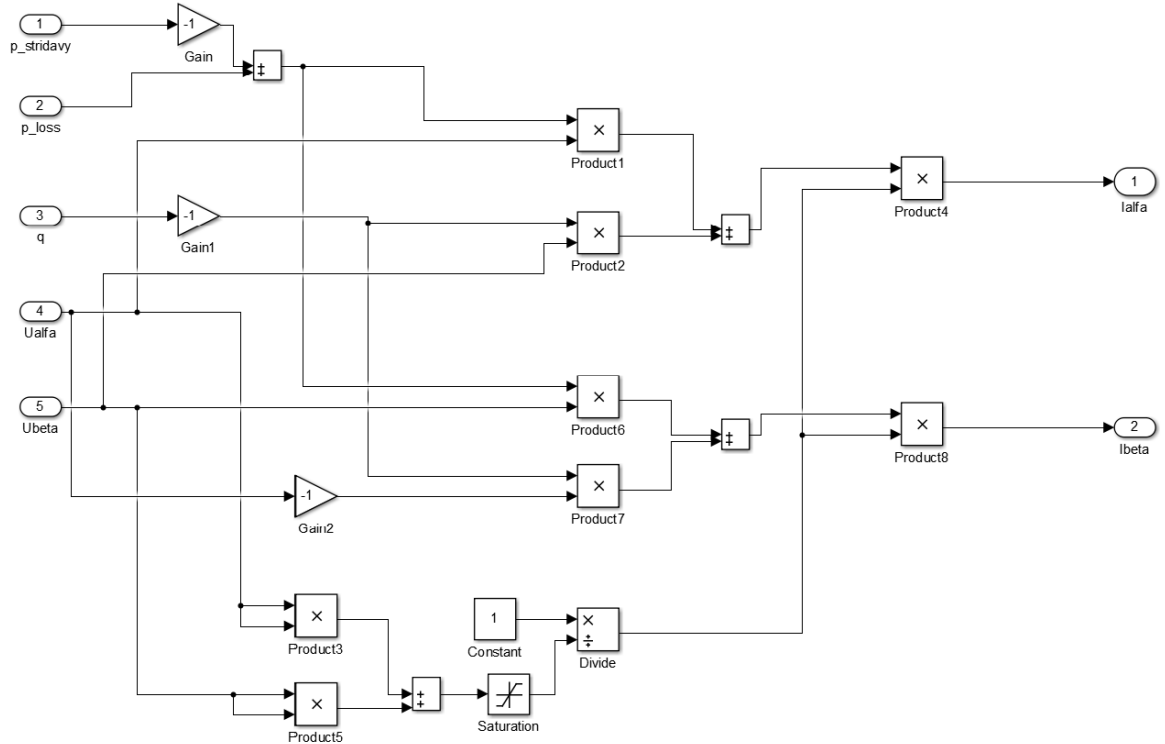


Obrázek 21: Dobíjení kondenzátoru

p_loss pokračuje do výpočtu kompenzačních proudů a uc dále omezuje výstupní napětí měniče.

4.7 Výpočet kompenzačních proudů

Pro výpočet požadovaných kompenzačních proudů je třeba implementovat vztahy (17) a (19).



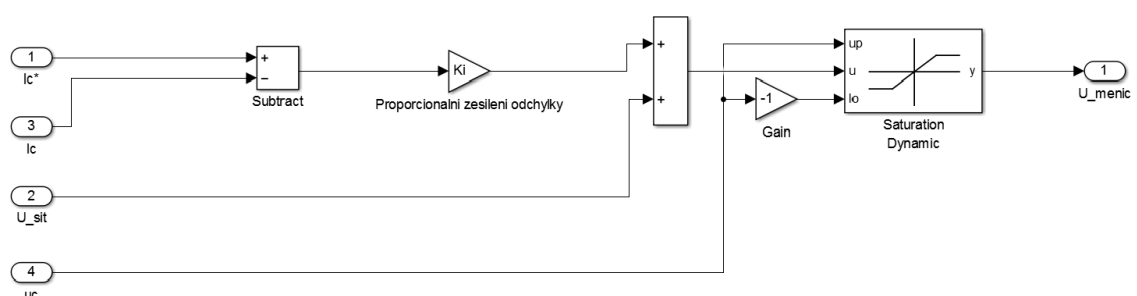
Obrázek 22: Výpočet kompenzačních proudů v rovině α, β

Blok saturace je zde pro ošetření dělení nulou. Inverzní Clarkové transformace následuje za tímto blokem - není třeba uvádět, blok by byl podobný Clarkové transformaci, ale pracuje se s inverzní transformační maticí - vztah (19) a výstupem jsou požadované kompenzační proudy I_{Ca}^* , I_{Cb}^* , I_{Cc}^* .

4.8 Simulace PWM (resp. převod proudu na napětí)

Požadovaný proud filtru se musí převést na napětí měniče. Napětí měniče by se následně porovnávalo s pilotovým průběhem 20 kHz a realizovalo by se spínání.

Detailní simulace pulsně šířkové modulace je v práci nahrazena spojitou hodnotou napětí měniče, která je na výstupu následujícího bloku:



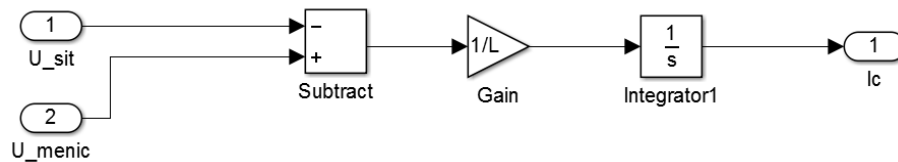
Obrázek 23: Převod požadovaného proudu na výstupní napětí měniče

Jak je vidět na obrázku, požadovaná hodnota kompenzačního proudu je porovnávána se skutečnou a jejich odchylka zesiluje či zeslabuje výstupní napětí měniče. Pro správnou funkci PWM zároveň napětí na výstupu nemůže nikdy být vyšší, než je napětí na kondenzátoru. Pokud by bylo v záměru přesně simulovat PWM, tak by za blokem saturace následoval komparátor, který by měl na jednom vstupu napětí měniče a na druhém trojúhelníkový průběh modulační frekvence (většinou 20 kHz).

4.9 Vazební indukčnost

Vazební indukčnost se umísťuje z důvodu omezení velkého di/dt . Velká změna proudu se může rychle promítat zpátky do výpočtu a to zase do výstupního napětí měniče. To by způsobilo jeho rozkmitání. Tenhle jev je hodně závislý i na impedanci sítě a nastavení celého filtru - bude o tom pojednáno v kapitole o výsledcích simulace.

Pro simulaci vazební indukčnosti slouží tedy následující blok. Vazební indukčnost L je zadávána ze skriptu.



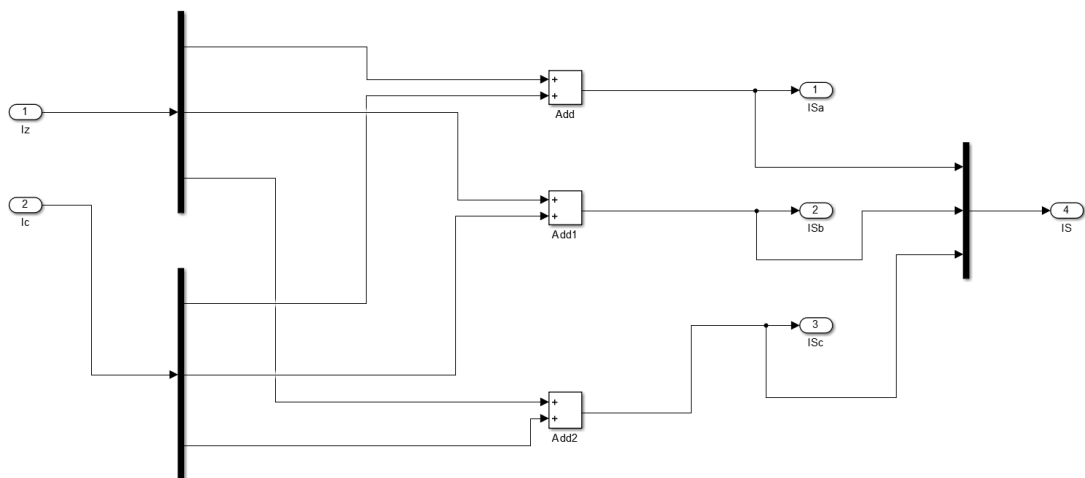
Obrázek 24: Simulace vazební indukčnosti

Skutečný kompenzační proud se tedy vypočítává zde, pro něj platí:

$$i_C = (u_{menic} - u_{sit}) / (sL) \quad (23)$$

4.10 Proud sítě

Proud sítě je dán součtem proudu zátěže a paralelního aktivního filtru:



Obrázek 25: Výpočet proudů v síti

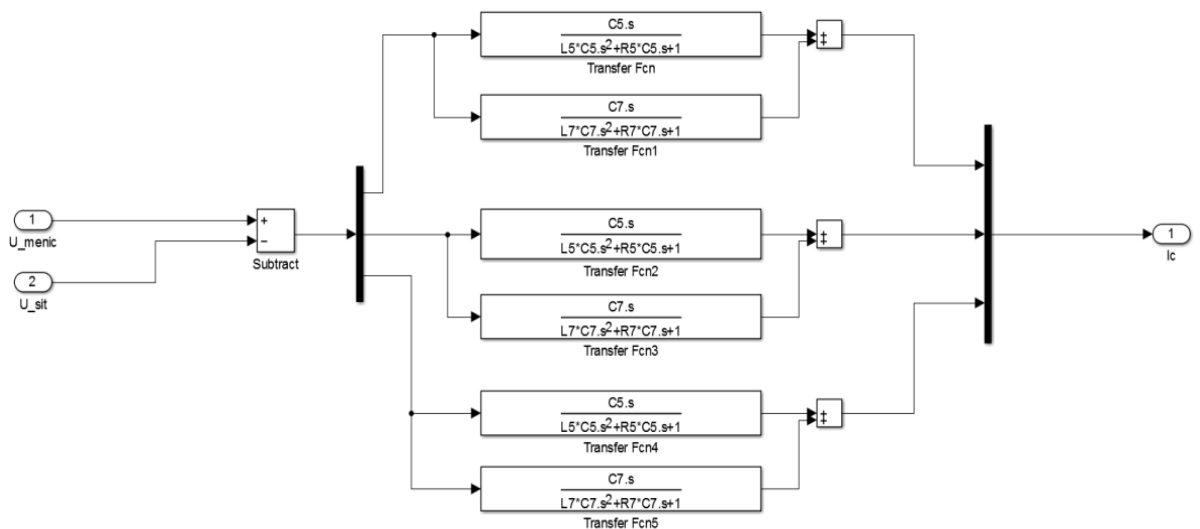
Po správném propojení všech bloků už lze sestavit celý model. Kompletní schéma simulačního modelu je v příloze.

4.11 Úprava modelu na hybridní filtr

Zde bude stručně popsána úprava modelu na hybridní filtr. Liší se v následujících bodech:

- 1) Ve výpočtu okamžitého výkonu pro HF figuruje proud zdroje místo proudu zátěže.
- 2) Vazební člen je zde pasivní filtr.
- 3) Kompenzuje se zde pouze střídavá složka reálné a imaginární části okamžitého výkonu.
- 4) V souladu s [2] bude pro určení střídavých složek okamžitého výkonu použit filtr typu horní propust.
- 5) Dobíjení kondenzátoru by se kvůli LC vazbě neprojevovalo v reálné části okamžitého výkonu, ale v imaginární. To zde nebude realizováno.
- 6) Není zde realizována simulace PWM. Výstupní napětí měniče se realizuje zesílením požadovaného proudu o aktivní impedanci.

Pasivní filtr je zde realizován přenosovými funkcemi pro pátou a sedmou harmonickou. Výsledný proud hybridního filtru je na výstupu následujícího bloku:



Obrázek 26: Vazební člen hybridního filtru

Přenosová funkce vychází z napěťové rovnice pro vazební člen. Je uvažován LC rezonanční článek a odpor cívky R. Potom pro napětí na článku lze psát:

$$u = \frac{1}{C} \cdot \int i \, dt + L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i$$

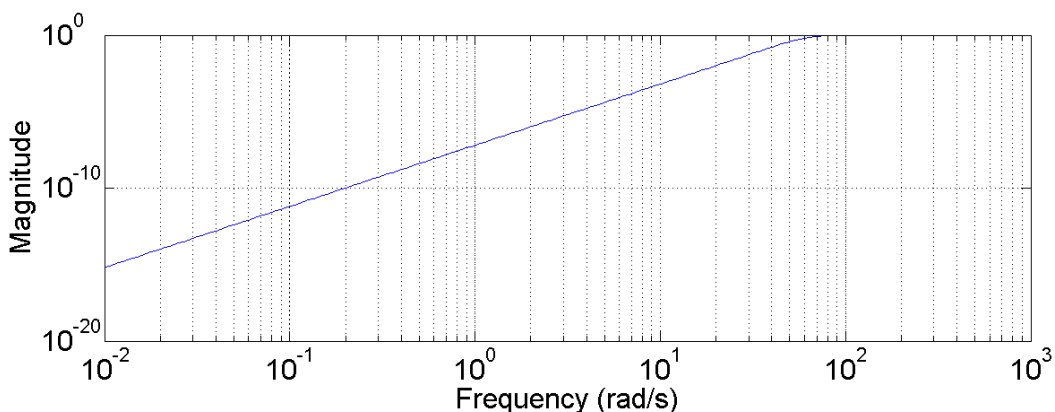
S použitím Laplace:

$$u = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{s} \cdot i + L \cdot s \cdot i + R \cdot i$$

A po úpravě:

$$i = u \cdot \frac{C \cdot s}{(L \cdot C) \cdot s^2 + (R \cdot C) \cdot s + 1}$$

Filtr typu horní propust je realizován funkcí lp2hp (lowpass-to-highpass). Funkce transformuje prototyp analogového filtru typu dolní propust na filtr typu horní propust s požadovanou zlomovou frekvencí. Je tedy transformován předešlý filtr, navrhnutý Butherworthovou aproximací. Zlomová frekvence je stejná, jako u dolní propusti. Správnou funkci je opět vhodné ověřit frekvenční charakteristikou (funkce freqs):

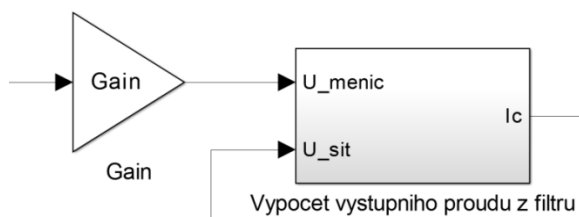


Obrázek 27: Frekvenční charakteristika filtru typu horní propust

Chybí zde blok simulace PWM. Ten je nahrazen pouhým zesílením požadovaného kompenzačního proudu a výsledkem je výstupní napětí měniče. Požadovaný kompenzační proud se vypočte obdobně jako u paralelního AKF, ale ve výpočtu okamžitých výkonů místo fázových proudů zátěže figurují fázové proudy zdroje (řídící algoritmus pro hybridní filtr kapitola 3.3). Pro výstupní napětí měniče platí:

$$u = Gain \cdot I_k^*$$

V Simulinku to vypadá následovně:



Obrázek 28: Proud hybridního filtru

Proud I_c na obrázku je proud vstupující, resp. vystupující z hybridního filtru.

Zesílení je zadáváno ze skriptu a je to v podstatě aktivní impedance (kapitola 2.4). Samotný výpočtový blok je v úvodu této podkapitoly. Dobíjení kondenzátoru zde není realizováno.

Celé schéma modelu hybridního filtru je k dispozici v příloze.

5 VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ SIMULACE

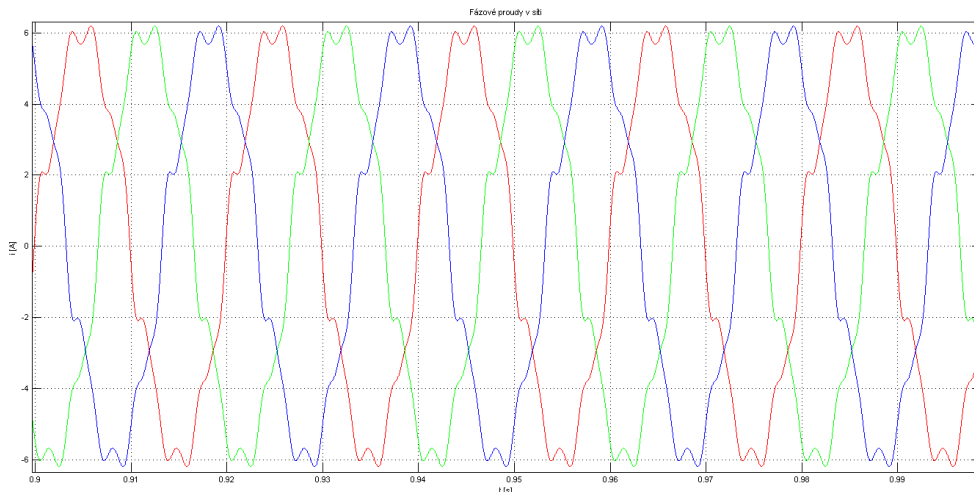
Paralelnímu AKF byla věnována větší pozornost při sestavování modelu. Je potřeba to zmínit hned v úvodu této kapitoly, protože není v záměru určit, který z filtrů je lepší. Jde o porovnání jejich funkcí v této konkrétní implementaci. V práci jde především o základní pochopení aktivního filtrování. Pro to je paralelní AKF názornější a srozumitelnější a u něj je implementován i vliv dobíjení kondenzátoru. V následujícím textu se pro porovnání sledují hlavně proudy v síti při zapnutí aktivního resp. hybridního filtru. Některé průběhy napětí sítě a kompenzačních proudů modelů jsou k dispozici v příloze. Paralelní AKF už bude označován pouze AKF. Hybridní filtr bude i nadále označován HF.

Pokud nebude řečeno jinak, platí:

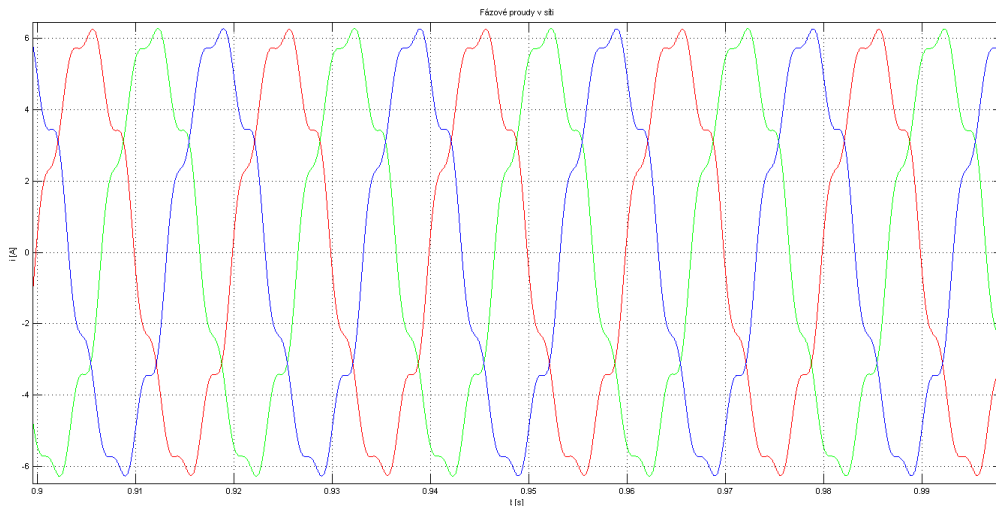
Aktivní filtry se připojují v simulaci v čase `switchTime = 0,8 s`

Indukčnost sítě `Sit.Ls = 0.0001 H`

Proudy v síti bez připojených AKF a HF



Obrázek 29: Proudy v síti bez připojeného AKF

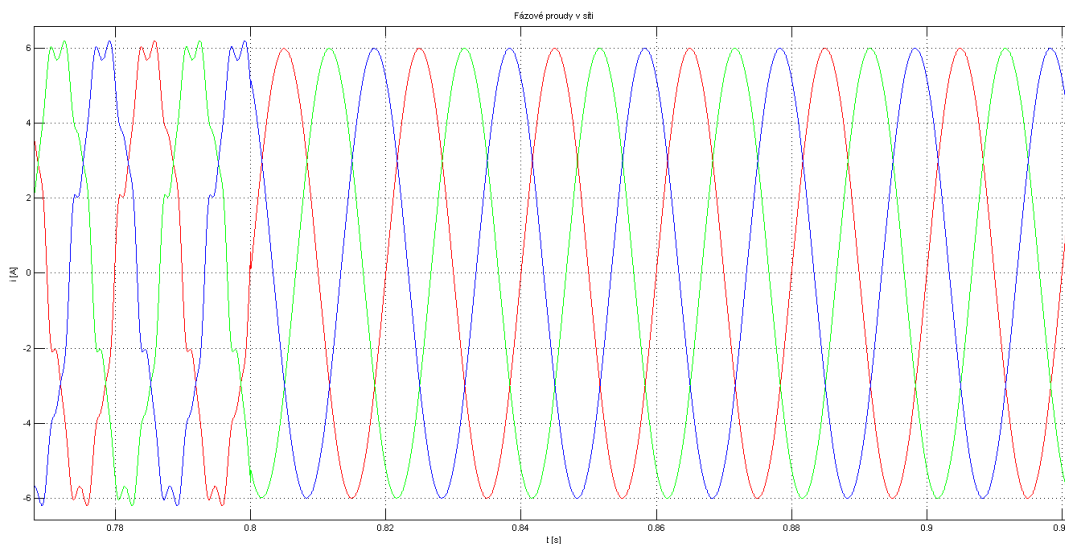


Obrázek 30: Proudy v síti bez připojeného HF (pouze pasivní filtr)

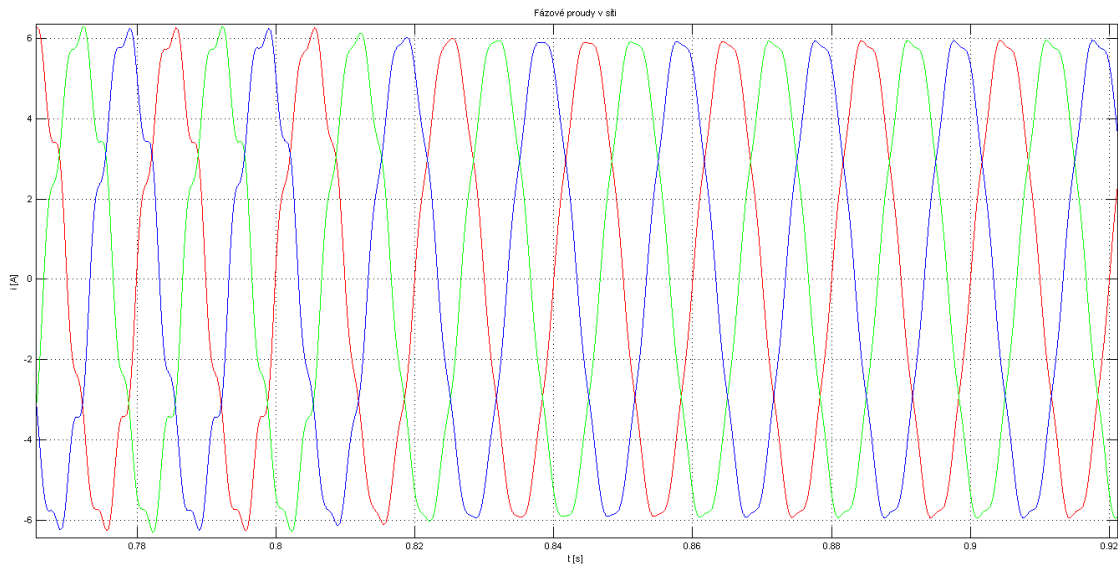
U AKF modelu se v síti vyskytují stejné proudy, jako generuje nelineární zátěž

U HF jde vidět zásah pasivního filtru a proudy v síti nejsou totožné s proudy odebíranými zátěží.

Proudy v síti po připojení AKF a HF

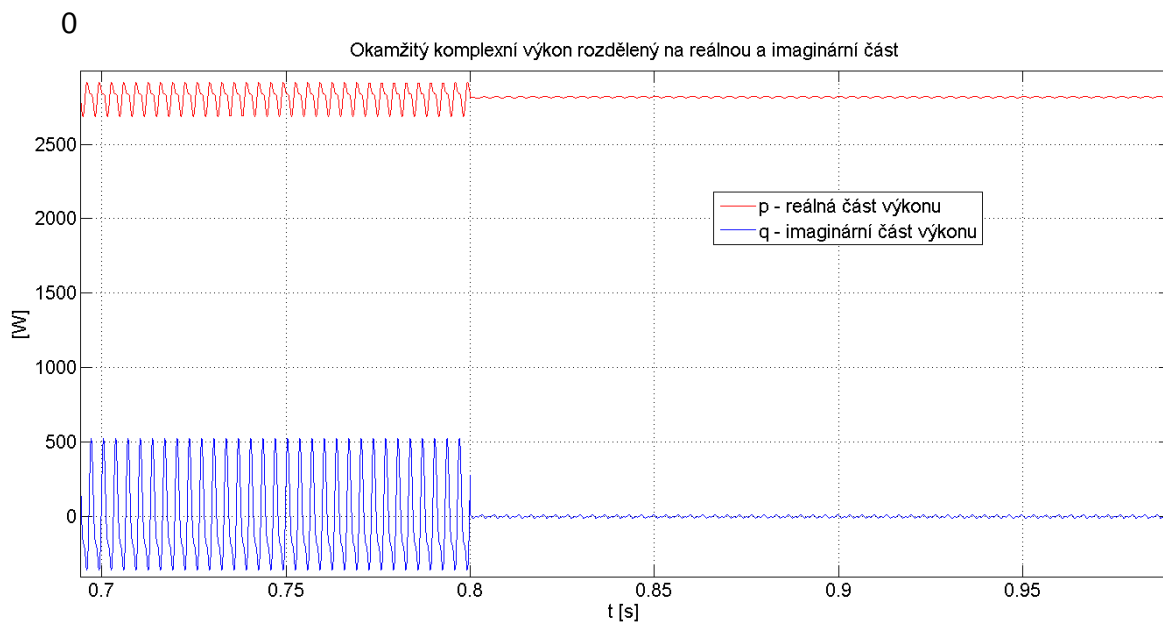


Obrázek 31 Proudy v síti s připojeným AKF

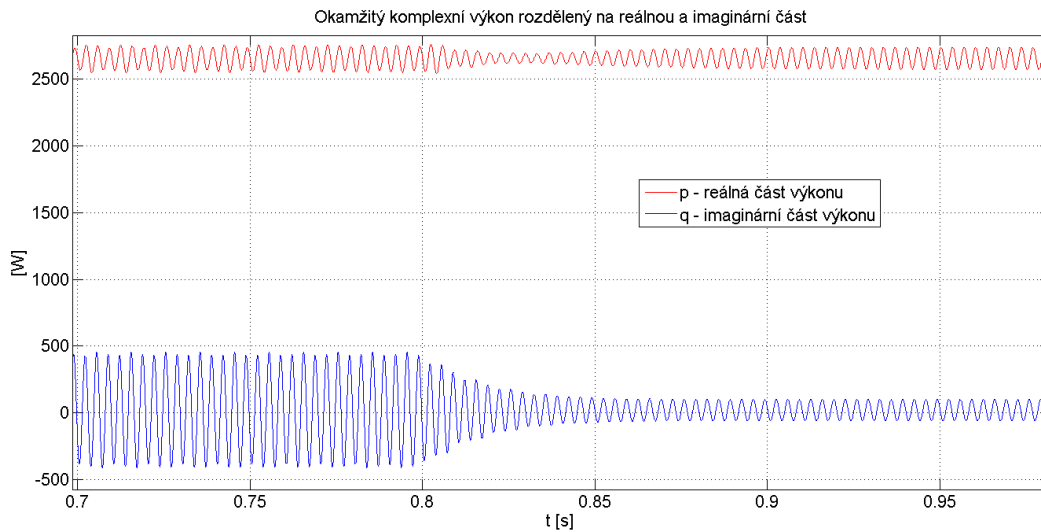


Obrázek 32: Proudů v síti s připojeným HF

Je na první pohled patrné, že proud v síti se zlepšil pro oba modely. Funkce je tedy potvrzena. Hybridní filtr ovšem v této simulaci nefiltruje všechny harmonické. Názorněji to jde vidět v okamžitých výkonech přenášených ze sítě do systému:



Obrázek 33: AKF - Okamžitý výkon přenášený ze sítě do systému

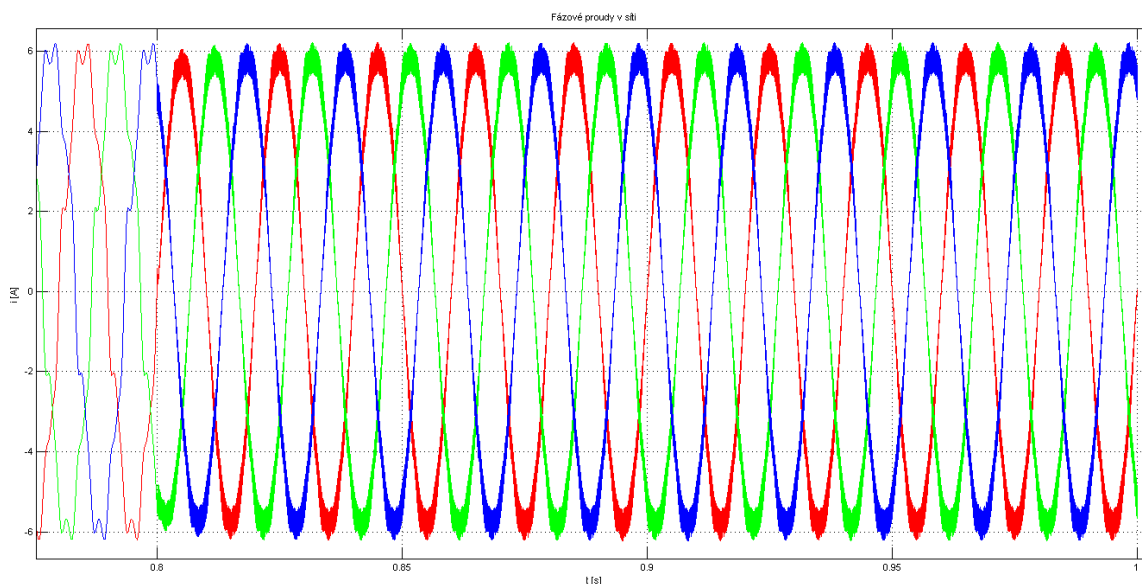


Obrázek 34: HF - Okamžitý výkon přenášený ze sítě do systému

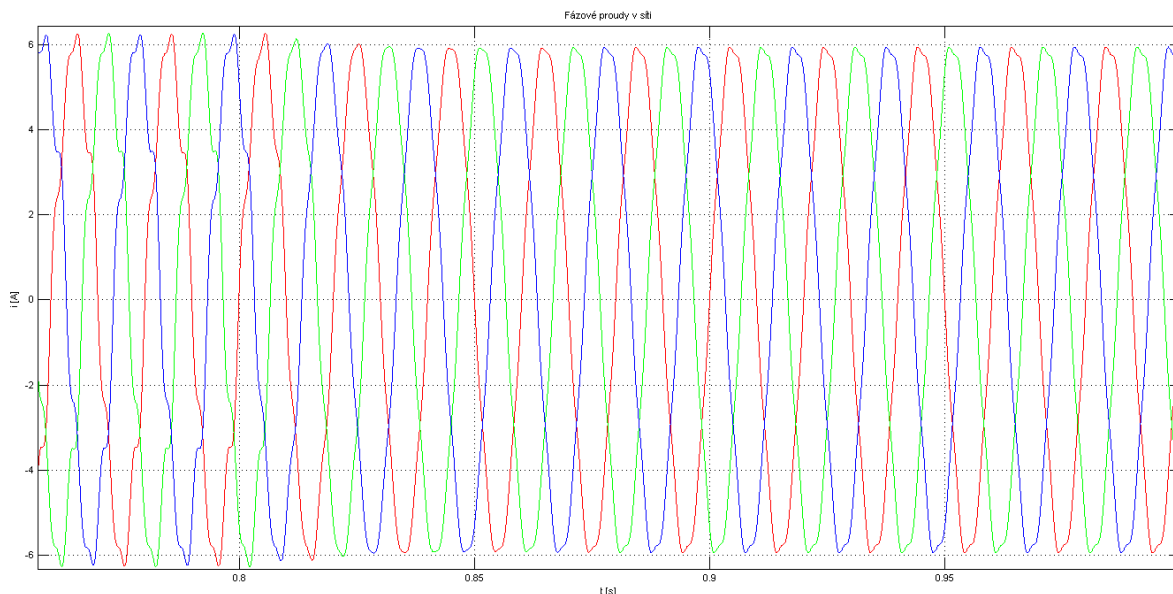
. AKF vyfiltroval všechny harmonické. HF v této simulaci nekompensuje harmonické ideálně.

5.1 Vliv impedance sítě

Předešlé průběhy platily pro indukčnost sítě 0,0001 H. Nyní je indukčnost desetkrát větší, tedy: $S_{it}.L_s = 0,001$ H.



Obrázek 35: Vliv impedance sítě AKF



Obrázek 36: Vliv impedance sítě HF

Zde je vidět, že HF je stabilní pro různé impedance sítě. Kompenzuje stejně jako v minulém případě.

AKF se naopak rozkmital. Rychlá změna proudu změní napětí na impedanci sítě a to se vrací zpátky do výpočtu. Vazební indukčnost filtru sice zpomaluje změnu proudu, ale v tomto případě to nestačí. Může se zvýšit indukční vazba, tím ale rostou jednak parazitní vlastnosti a hlavně se tím zhoršují kompenzační proudy. Další možnost je poupravení proporcionálního členu u odchylky v PWM řízení. To ale také vede v jistých případech k rozkmitání nebo ne úplně správným kompenzačním proudům.

Plyne z toho, že v této implementaci je AKF hodně náchylný na jakékoliv rychlé změny a musí se správně nastavovat jeho parametry. Aby byl AKF stabilnější, bylo by potřeba implementovat omezovací členy změny napětí už na vstupu AKF nebo ve výpočetní části.

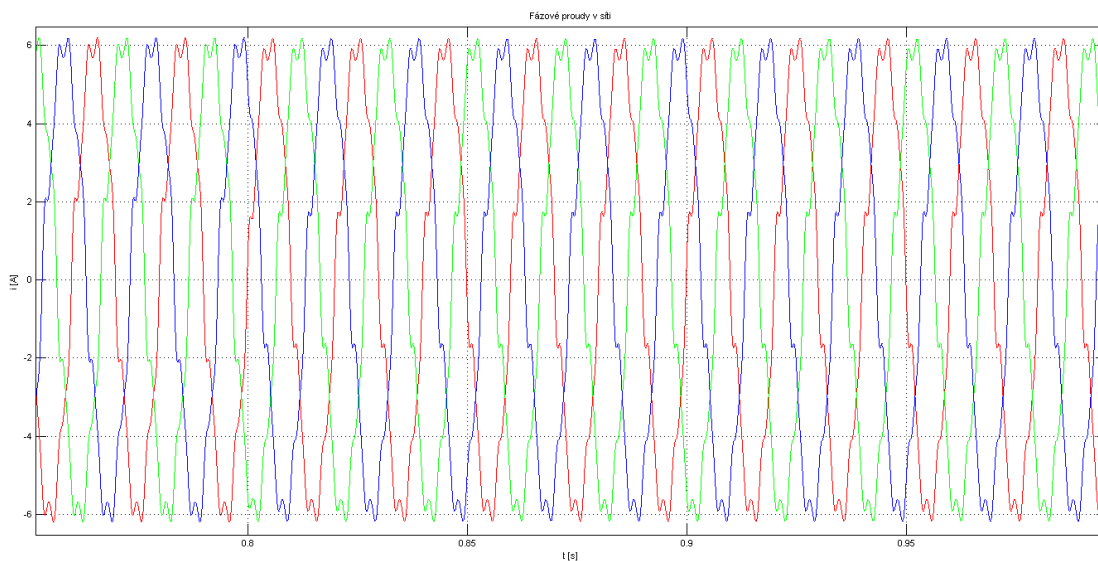
5.2 Výstup měniče

V minulých případech bylo uvažováno:

$K_i = 1000$ Proporcionální zesílení odchylky požadovaného kompenzačního proudu od skutečného a projeví se zesílením nebo zeslabením výstupního napětí měniče u AKF.

Gain = 100 Zesílení kompenzačních proudů u HF.

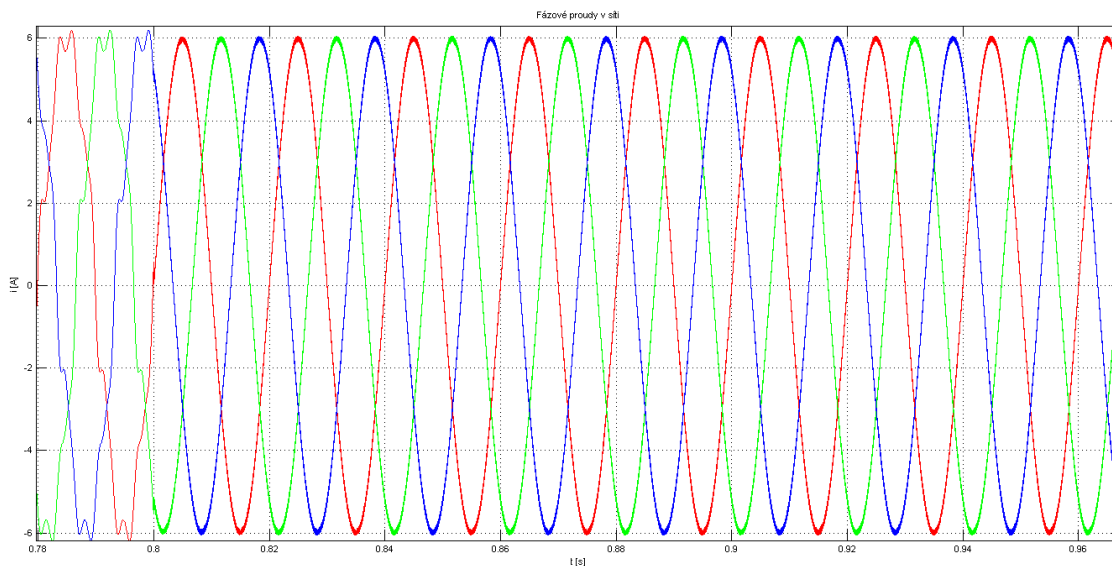
Pokud $K_i = 10$ pro AKF:



Obrázek 37: Proudů v síti - AKF, $K_i = 10$

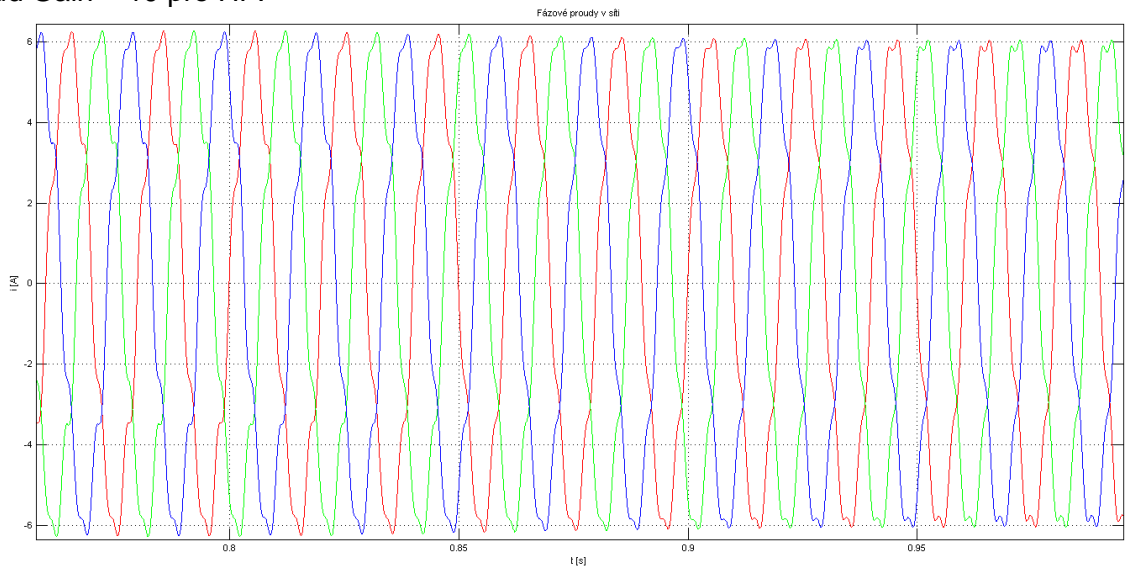
Tento jev byl zmiňován v minulé podkapitole. Simulace PWM není dostatečně citlivá, aby realizovala požadované kompenzační proudy a AKF zde není schopný žádné kompenzace.

Na druhou stranu, kdyby bylo K_i moc velké, může se to projevit opět kmitáním měniče. Při $S_{it.Ls} = 0,0001$ [H] a vazební indukčnosti $L = 0,01$ [H] (tedy stejné nastavení, jako v úvodu kapitoly) nastává mírné kmitání pro $K_i = 10000$.



Obrázek 38: Proudů v síti - AKF, $K_i = 10000$

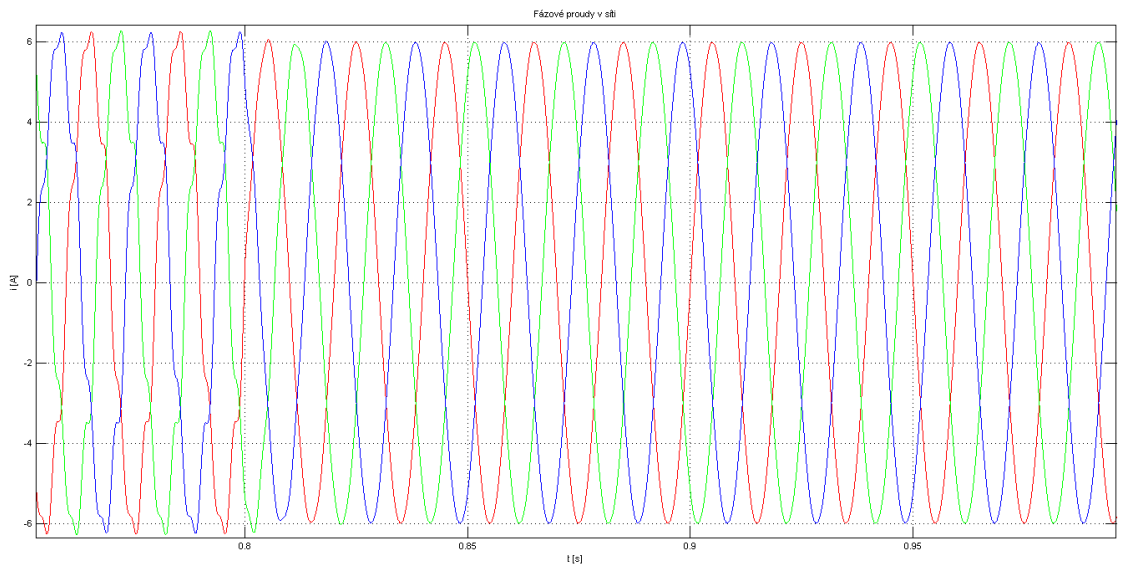
Pokud Gain = 10 pro HF:



Obrázek 39: Proudy v síti - HF, Gain = 10

Po připojení HF zde dochází k přechodnému ději. Po ustálení přechodného děje je vidět, že filtr tlumí málo, téměř vůbec.

Zde platí, že čím větší je zesílení, tím lépe bude HF filtrovat. Je zde prezentován i průběh při Gain = 1000. V reálné situaci by se toho docílilo těžko, jde ale pouze o názornost.

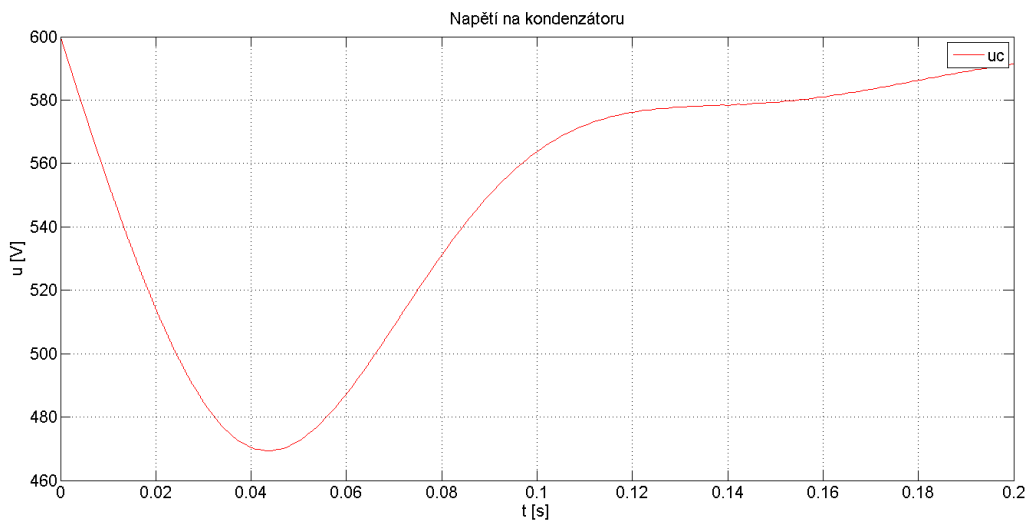


Obrázek 40: Proudy v síti - HF, Gain = 1000

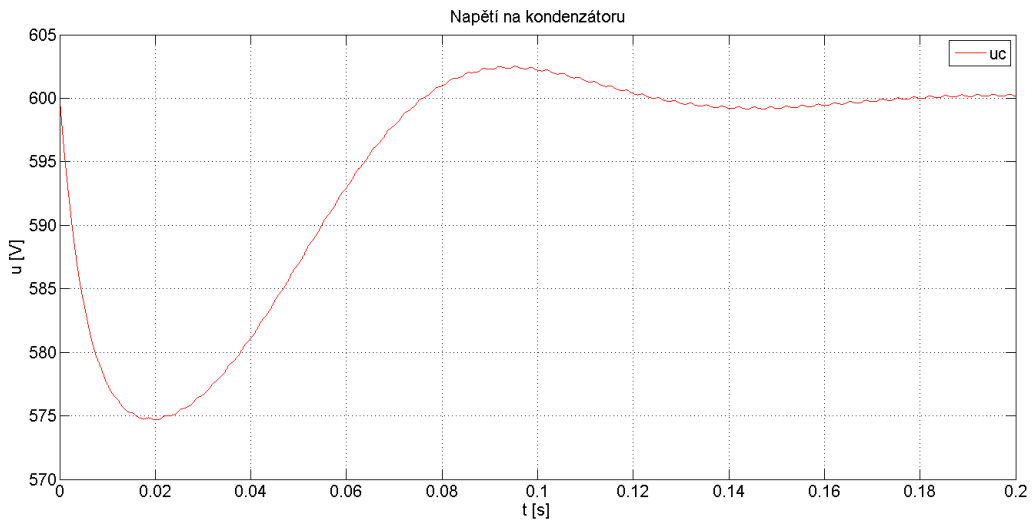
5.3 Vliv PI regulátoru u AKF

Zde je hlavně pozorován vliv proporcionální složky regulátoru. Při proudovém rázu je požadováno rychlé dobití kondenzátoru a pro to je potřeba mít vysoké P. To ale nelze volit libovolně. Pokud PI regulátor příliš citlivě přenáší drobné změny napětí, prudce to ovlivňuje výstupní proud měniče a ten nemusí kompenzovat správně. V krajním případě se může objevit kmitání.

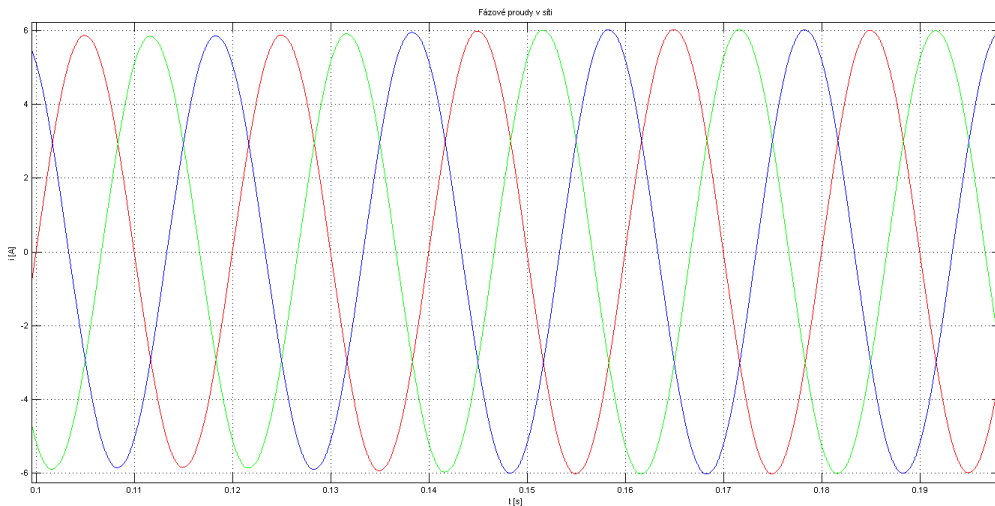
Dobíjení kondenzátoru



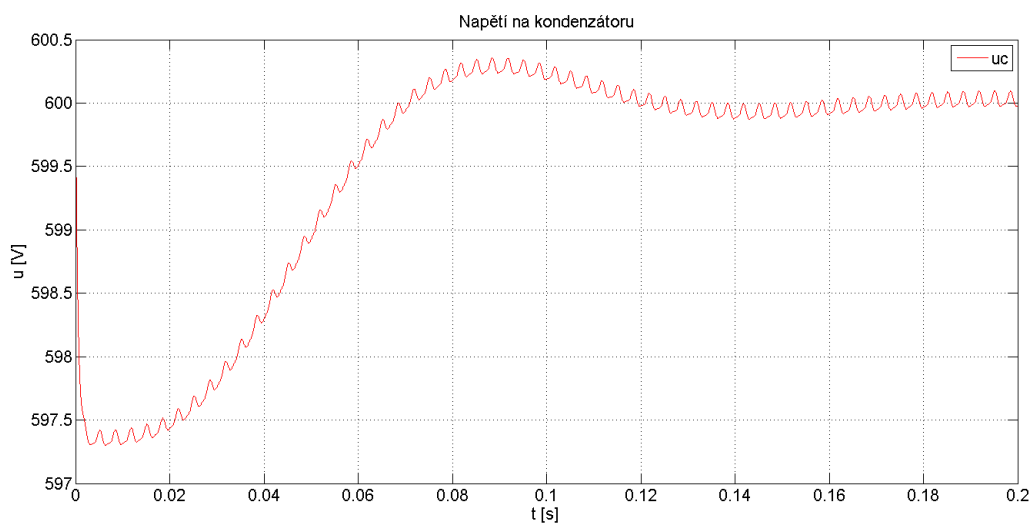
Obrázek 41: Napětí na kondenzátoru při $P = 10$



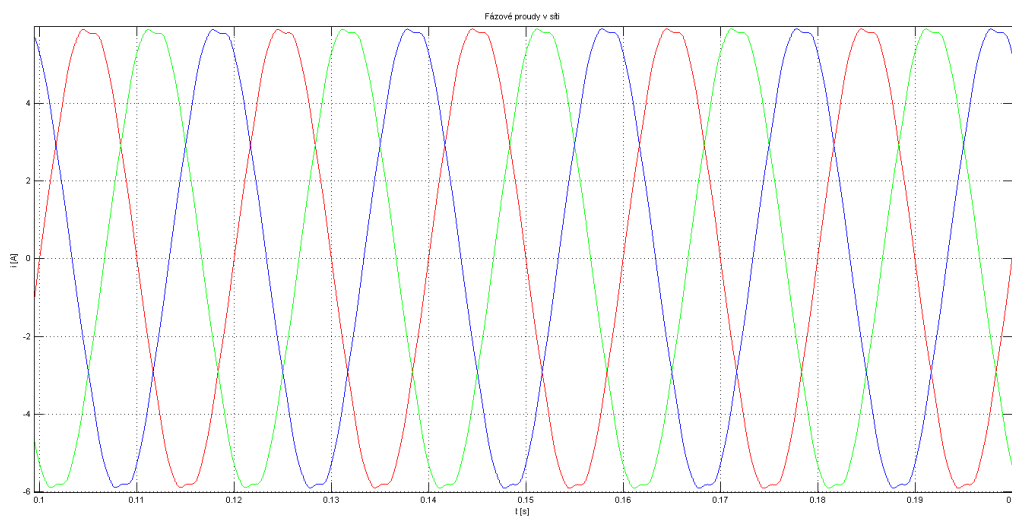
Obrázek 42: Napětí na kondenzátoru při $P = 100$



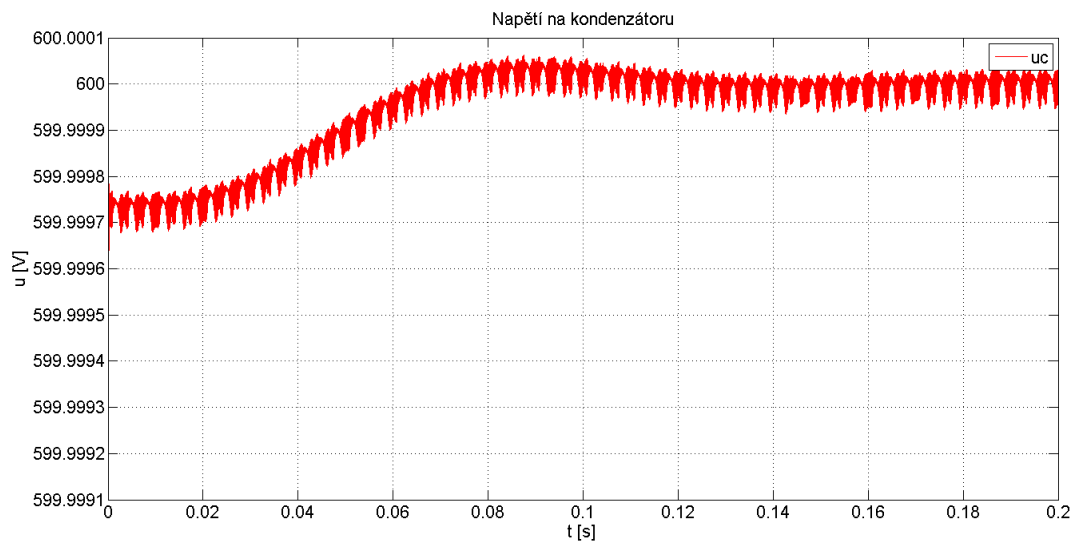
Obrázek 43: Proudů sítě při $P = 100$ - v pořádku



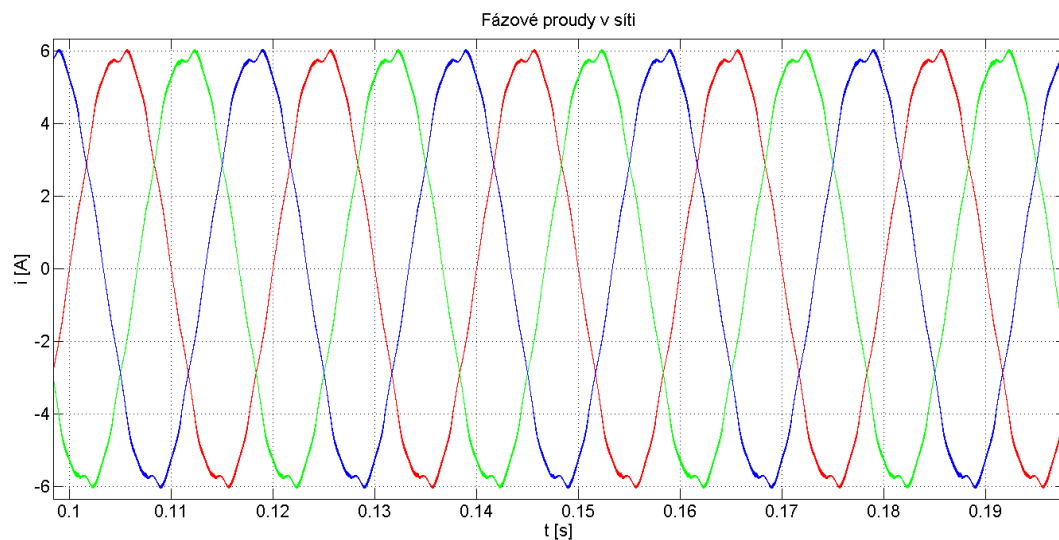
Obrázek 44: Napětí na kondenzátoru při $P = 1000$



Obrázek 45: Proudů sítě při $P = 1000$ - horší kompenzace



Obrázek 46: : Napětí na kondenzátoru při příliš vysokém P - kmitání měniče



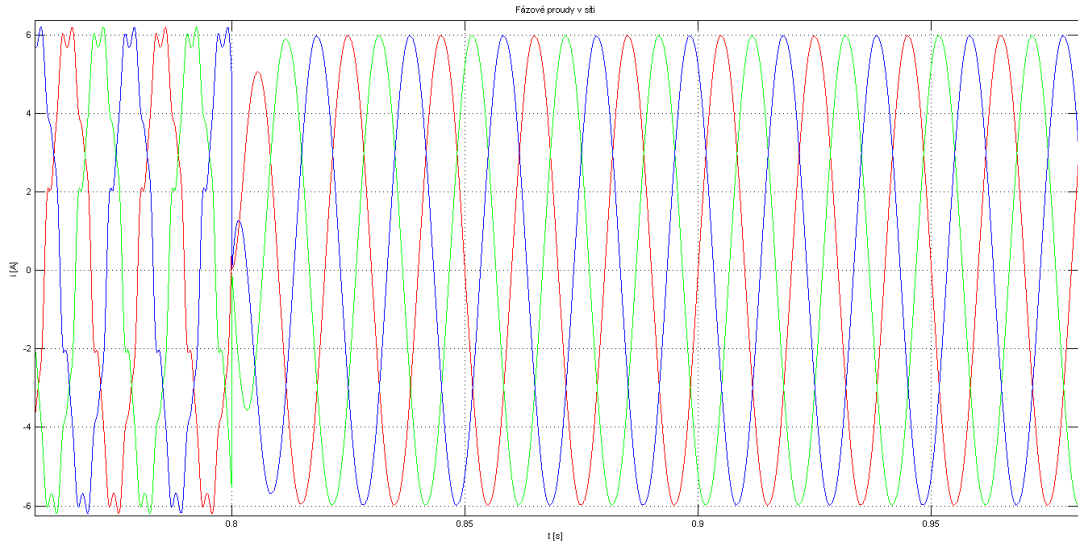
Obrázek 47: Proudů sítě při příliš vysokém P - kmitání měniče

Tyto průběhy platí pro stejné parametry sítě jako v úvodu kapitoly. Pro větší indukčnost sítě nebo při menší indukčnosti vazebního členu by se PI regulátor musel nastavovat daleko obezřetněji. Vliv integrační složky zde byl relativně zanedbatelný.

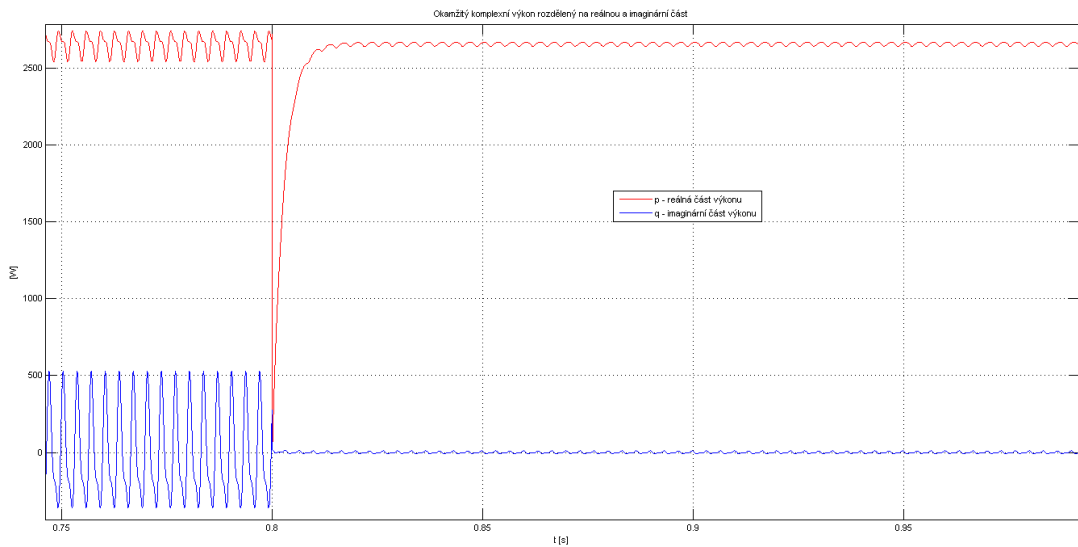
Vynechání filtru dolní propust

V kapitole 3 bylo psáno, že střídavá složka výkonu p se určí buď horní propustí nebo dolní propustí a vztahem: $\tilde{p} = p - \bar{p}$

Tak to bylo implementováno doposud. Nyní se do výpočtu namísto \bar{p} dosadí výstup z PI regulátoru p_{loss} .



Obrázek 48: Proudové vlny v síti při kompenzování - bez filtru dolní propust



Obrázek 49: Okamžitý výkon dodávaný ze sítě do systému - bez filtru dolní propust

AKF se po připojení snaží dodat veškerý výkon do zátěže a kondenzátor se začne vybíjet. PI regulátor zde chce udržet požadované napětí kondenzátoru a začne velice rychle dotahovat p_{loss} . Po krátké době se ustálí na střední hodnotě p_{loss} . Tuhle střední hodnotu AKF už nadále nekompensuje - odpovídá to základní složce proudu a napětí. a to je dodáváno ze sítě.

ZÁVĚR

Jednotlivé cíle byly splněny a dokonce byl i vylepšen řídicí algoritmus paralelního aktivního filtru, což ani nebylo v původním záměru práce.

V P-Q teorii se pracuje s okamžitými hodnotami napětí a proudu a vypočítává se z nich okamžitý výkon, který má svou reálnou a imaginární část. U paralelního aktivního filtru je potřeba rozložit reálnou část na střední a střídavou složku. V této práci potom kompenzujeme celou imaginární část a reálnou střídavou složku okamžitého výkonu. To je v první řadě realizováno filtrem typu dolní propust, který určuje střední složku výkonu. Střídavá se potom dopočte. Dolní propust se dá při lehké úpravě úplně vynechat, protože PI regulátor nahradí jeho funkci. V důsledku toho se velice zefektivní řídicí algoritmus paralelního aktivního filtru. Toto vylepšení je představeno v kapitole 5.3.

Z výsledků simulace vyplývá, že aktivní paralelní filtr v této implementaci je hodně náchylný na kmitání měniče. Konfigurace systému se dají sice poupravit a nastavovat tak, aby ke kmitání nedošlo, každá úprava je ale dost znatelná. Vhodnější by bylo implementovat omezení rychlé změny na vstupu filtru nebo ve výpočetní části. To bude předmětem dalšího zkoumání. Hybridní filtr se naopak jevil stabilní při různých konfiguracích systému.

Simulační modely lze nadále zlepšovat. Např. by bylo zajímavé pozorovat vliv AD převodníků ve výpočtu a jak by se tím měnila kompenzace. Dále by to chtělo pracovat se skutečnými nelineárními zátěži a pro to by bylo potřeba mít knihovnu, která není ve standardním balíku Matlabu pro studenty.

Dříve jsem simulace neuznával, protože jsem měl pocit, že v reálné situaci se příroda chová nepředvídatelně a to, co funguje v simulaci, nefunguje ve skutečnosti. Jestli to bude fungovat stejně i na skutečném měniči, bude předmětem dalšího studia. Nyní ale vidím, že simulace mají své opodstatnění a lze přijít k zajímavým věcem a minimalizovat ztráty při realizaci (převážně ekonomické). V podstatě při neustálém zlepšování simulačních modelů by jednou mohly sloužit k efektivnímu navrhování aktivních filtrů. Možná už něco takového je, ale zatím jsem se s tím nesetkal.

LITERATURA

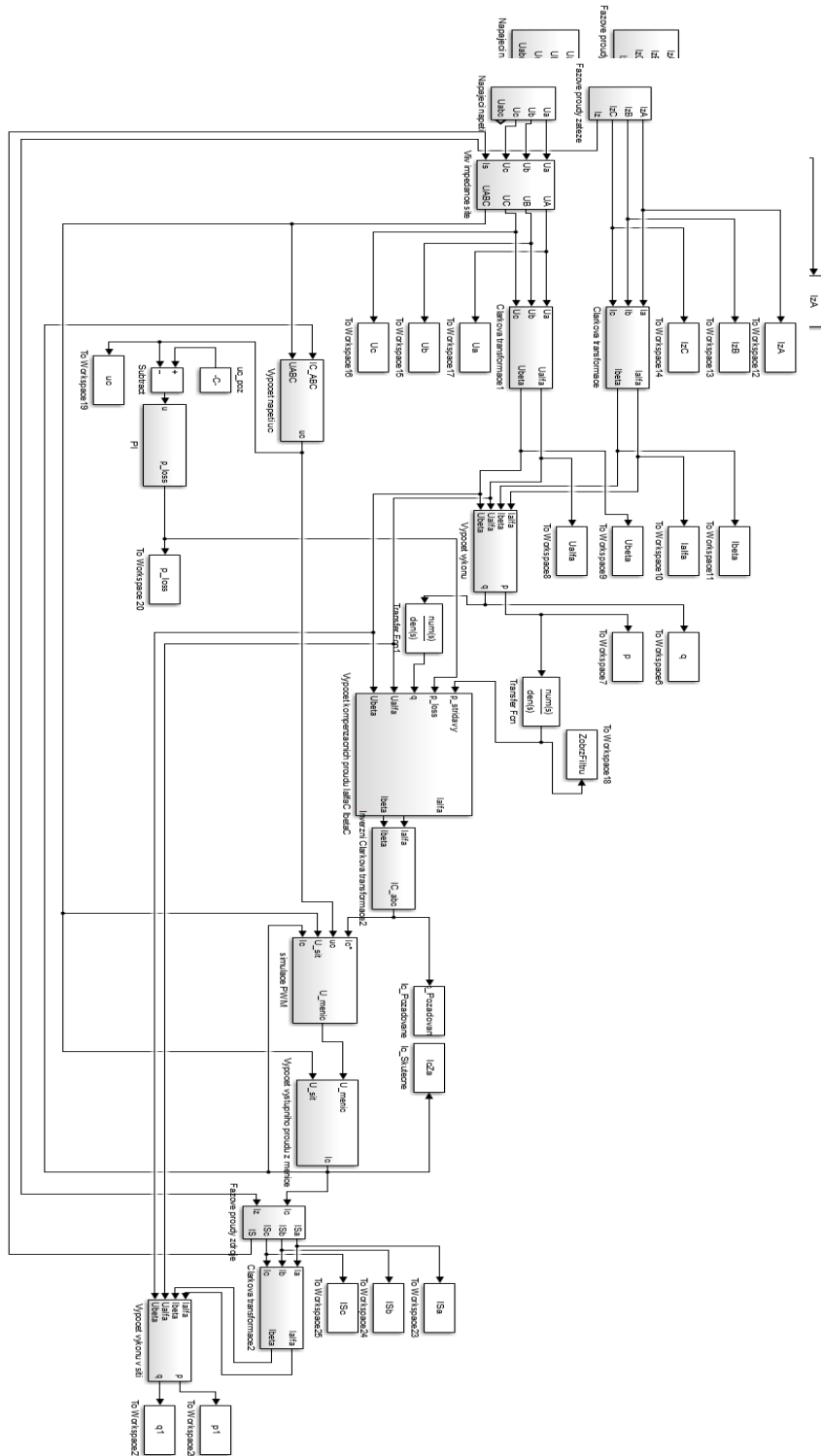
- [1] AKAGI, Hirofumi, EdsonHirokazu WATANABE a MaurícioAREDES. *Instantaneouspowertheory and applications to powerconditioning*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience/ John Wiley&Sons, 2007, xiv, 379 p. ISBN 0470107618.
- [2] HIDEAKI, HIROFUMI. *Practicalapproach to harmoniccompensation in powersystems ~ seriesconnectionofpassive and activefilters*. Nagaoka, 940-21, Japan.
- [3] HÁJEK Jan. *Vliv zařízení inteligentní budovy na kvalitu elektrické energie*. Diplomová práce. ČVUT FEL v Praze.
- [4] PELÁN Jaroslav. *Simulace aktivních paralelních a sériových hybridních filtrů*. Vědecký článek. ČVUT FEL v Praze .
- [5] Žáček Jaroslav. *Výkony a účinník v deformované síti podle současných názvoslovných norem*. Vědecký článek. ČVUT FEL v Praze.
- [6] LIMBURSKÝ Jan. *Výkonové aktivní filtry*. Bakalářská práce. ZČU FEL v Plzni
- [7] DRÁPELA Jiří *Vznik, šíření a důsledky harmonických*. Přednáška. Redakce elektrika.cz 20.9.2013

SEZNAM PŘÍLOH

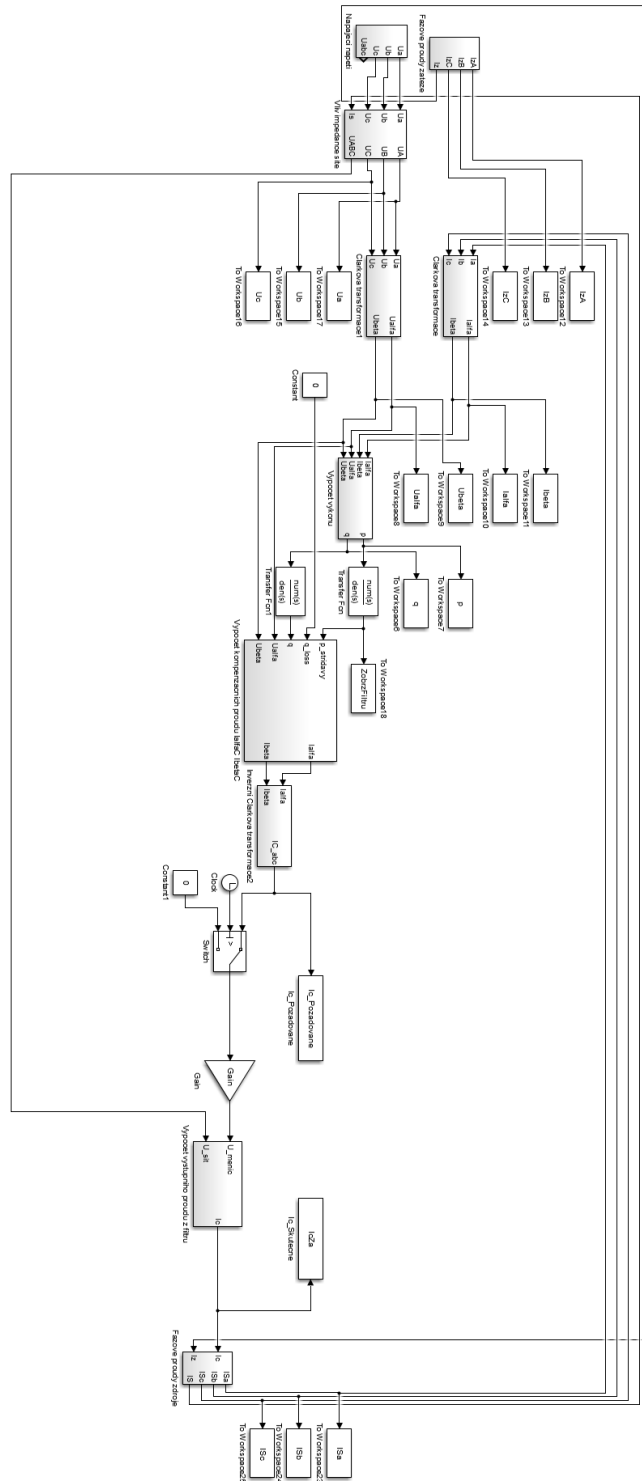
| | | |
|----------|------------------------------|-----------|
| A | Simulační modely | 44 |
| A.1 | Model AKF v Simulinku | 44 |
| A.2 | Model HF v Simulinku | 45 |
| A.3 | Část skriptu v Matlabu..... | 46 |
| B | výsledky simulace | 47 |
| B.1 | Kompenzační proudy AKF | 47 |
| B.2 | Kmitání měniče - AKF | 48 |

A SIMULAČNÍ MODELY

A.1 Model AKF v Simulinku



A.2 Model HF v Simulinku



A.3 Část skriptu v Matlabu

```
%Aproximace filru typu dolni a horni propust
%Nejdříve vytvoření prototypu filtru typu dolní propust
Buttherworthovou
%aproximací, následné převod na naše zlomové frekvence
pomoci funkcí lp2lp
%a lp2hp
filtrAvg.f0 = 10;           %mezni frekvence filtru
[Hz]
filtrAvg.N = 4;           %rad filtru
filtrAvg.w0 = 2*pi*filtrAvg.f0; %zlomova uhlova frekvence
filtru

filtrHigh.f0 = 10;
filtrHigh.w0 = 2*pi*filtrAvg.f0;

%prototyp dolni propust
[filtrAvg.z,filtrAvg.p,filtrAvg.k] = buttap(filtrAvg.N);
[filtrAvg.b,filtrAvg.a] =
zp2tf(filtrAvg.z,filtrAvg.p,filtrAvg.k);

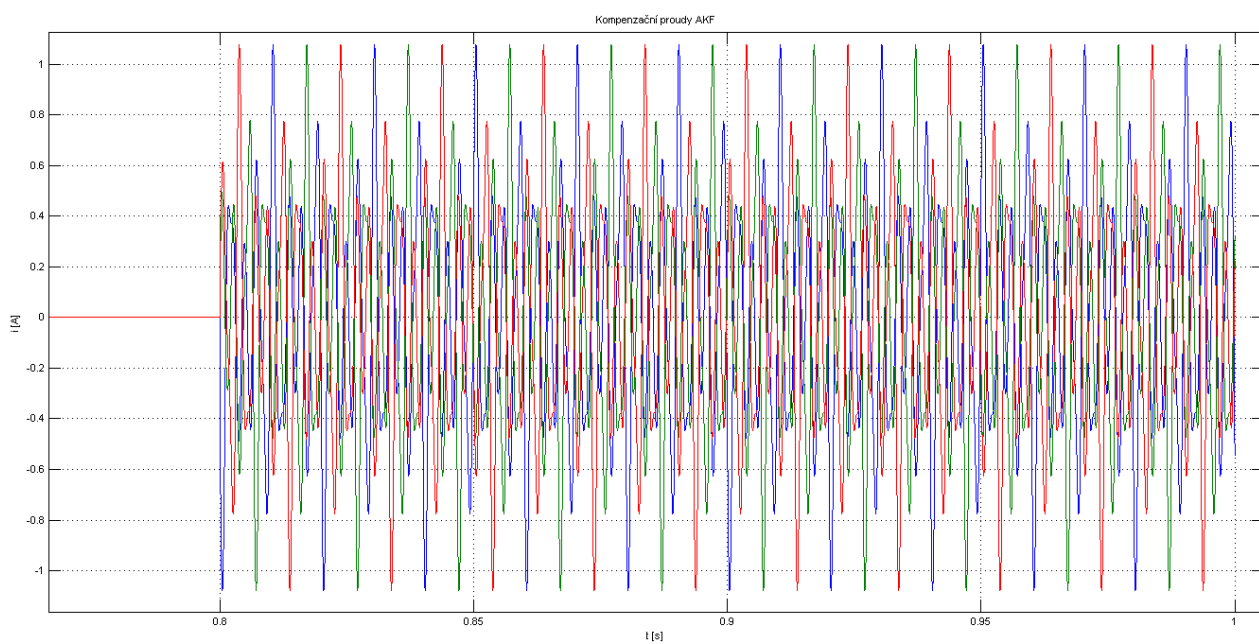
%prevod na horní propust se zlomovou frekvencí w0
[filtrHigh.b,filtrHigh.a] =
lp2hp(filtrAvg.b,filtrAvg.a,filtrHigh.w0);

%dolni propust se zlomovou frekvenci w0
%pro zero-pole blok
filtrAvg.z = filtrAvg.z * filtrAvg.w0;
filtrAvg.p =filtrAvg.p * filtrAvg.w0;
filtrAvg.k = filtrAvg.k * filtrAvg.w0^filtrAvg.N;

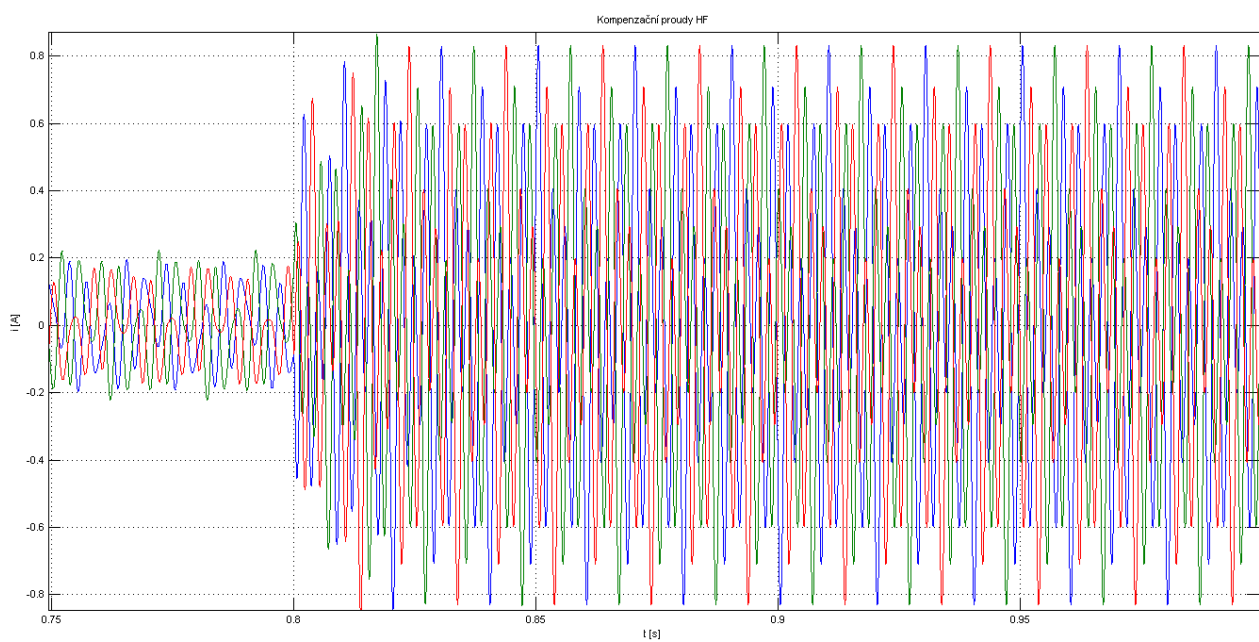
%dorni propust se zlomovou frekvenci w0
%pro vykresleni frekvencni charakteristiky, pripadne pro
TransferFcn blok
[b,a] = lp2lp(filtrAvg.b,filtrAvg.a,filtrAvg.w0);
```

B VÝSLEDKY SIMULACE

B.1 Kompenzační proudy AKF



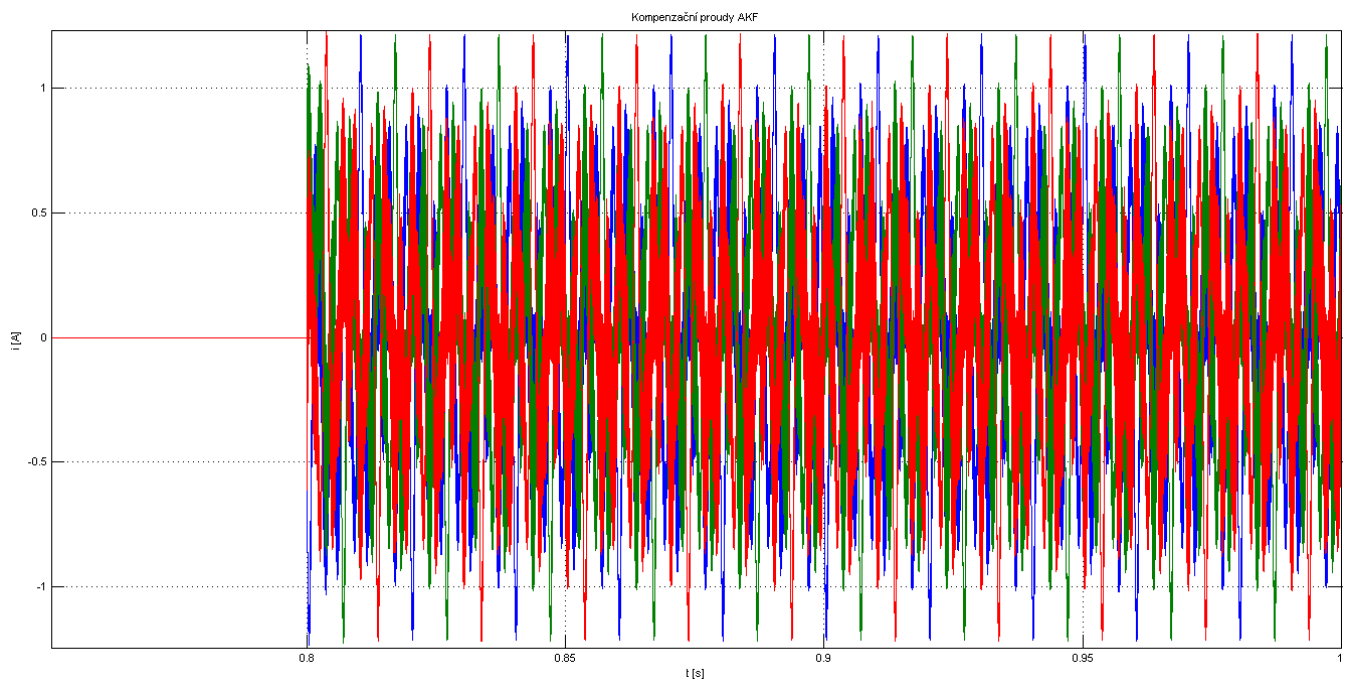
Obrázek 50: Kompenzační proudy AKF



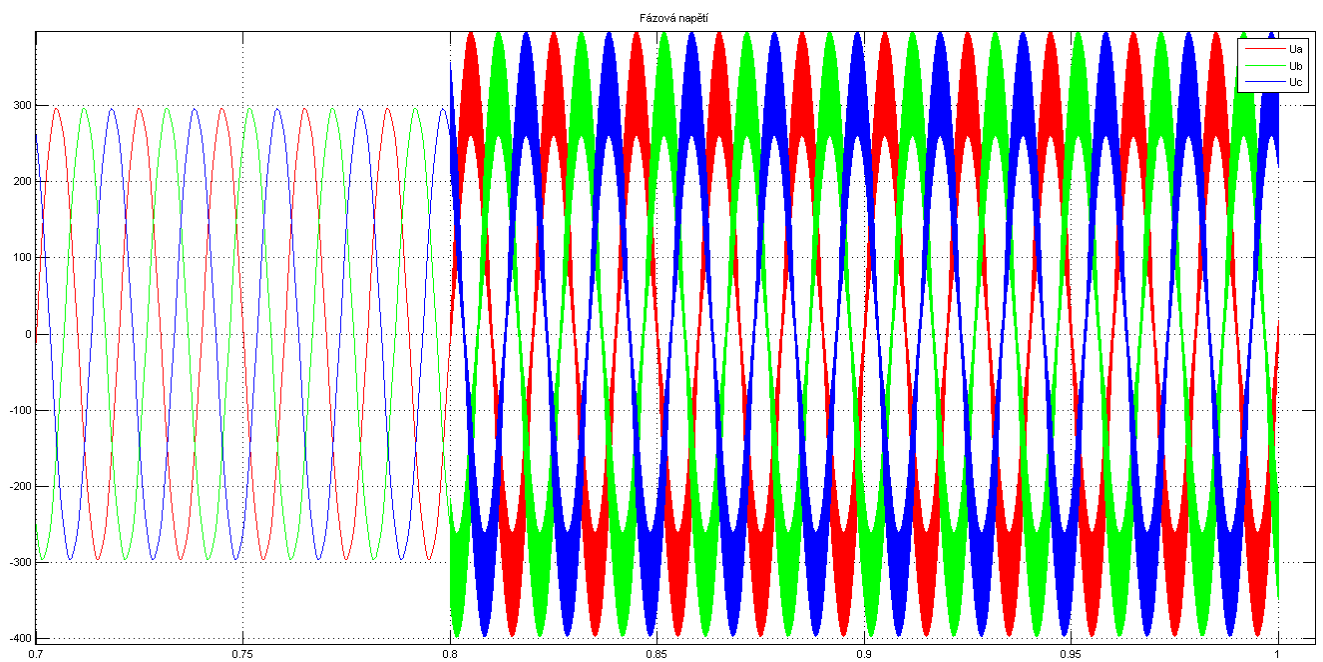
Obrázek 51: Kompenzační proudy HF

B.2 Kmitání měniče - AKF

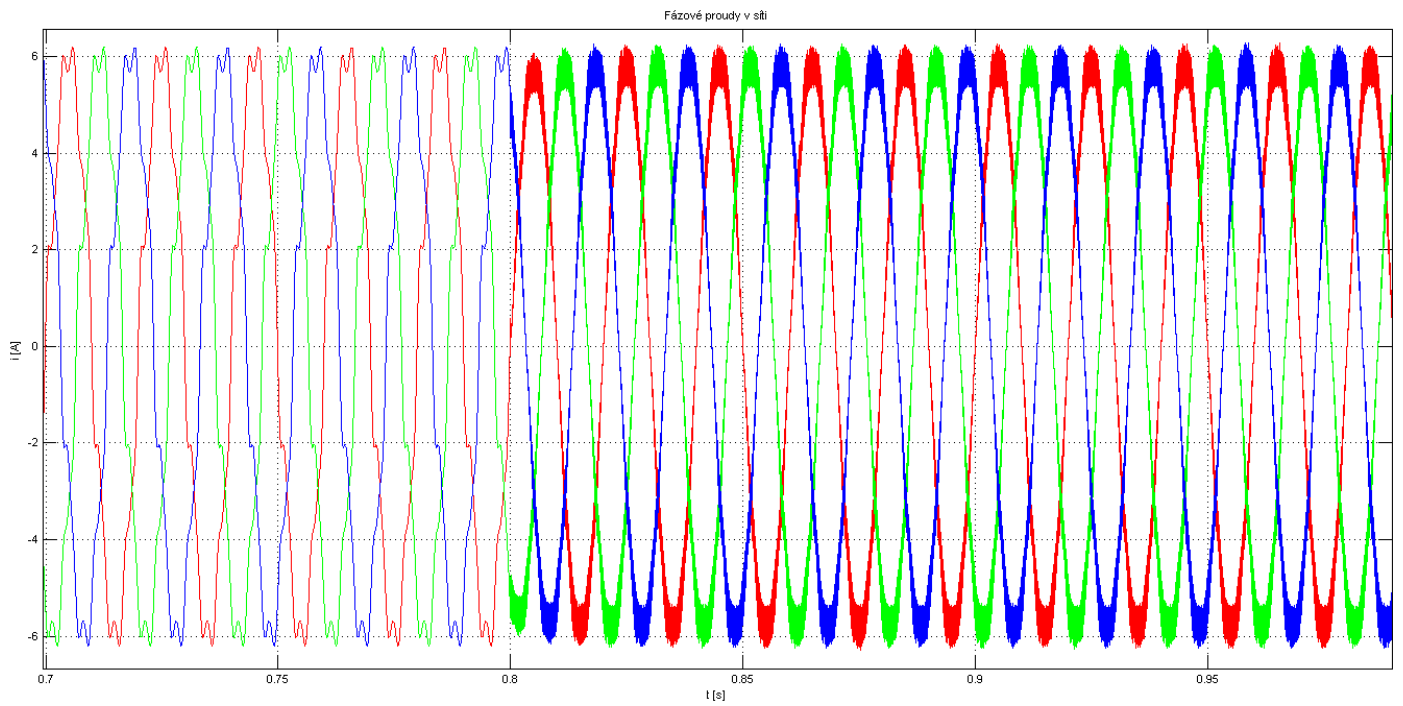
Při $L_s = 0,001$ H



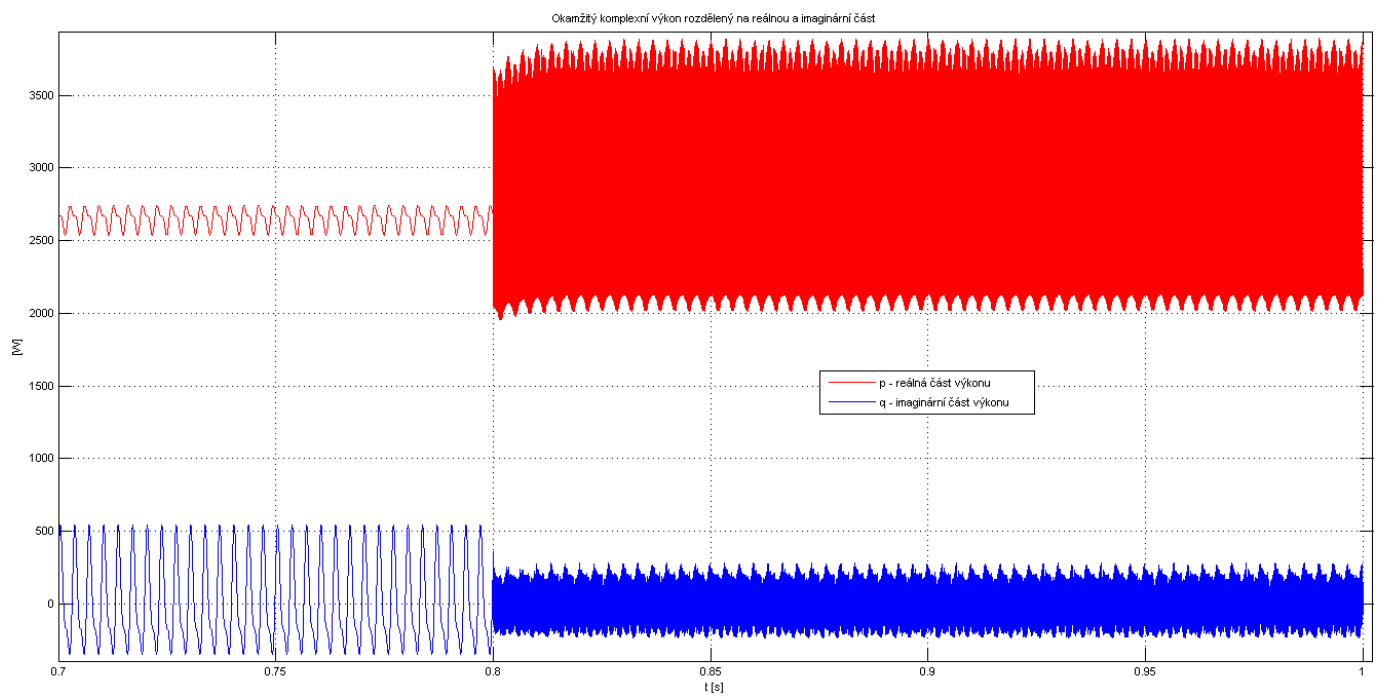
Obrázek 52: Komenzační proudy při kmitání



Obrázek 53: Fázová napětí sítě



Obrázek 54: Fázové proudy v síti



Obrázek 55: Okamžitý výkon přenášený ze sítě do systému