

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## Výkonové aktivní filtry

vedoucí práce: prof. Ing. Václav Kůs CSC.  
autor: Jan Limburský

2012



## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na základní popis problematiky výkonových aktivních filtrů ...

## **Klíčová slova**

aktivní filtr, harmonické, kompenzace, měnič

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1/6/2012

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSC. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH INDEXŮ</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>1. POPIŠTE ZÁKLADNÍ TYPY AKTIVNÍCH FILTRŮ A JEJICH FUNKCI</b> .....	<b>9</b>
1.1 PARALELNÍ AKTIVNÍ FILTRY.....	12
a) <i>Paralelní aktivní filtr s napěťovým zdrojem</i> .....	13
b) <i>Paralelní aktivní filtr s proudovým zdrojem</i> .....	14
1.2 SÉRIOVÉ AKTIVNÍ FILTRY.....	15
a) <i>Sériový aktivní filtr s napěťovým zdrojem</i> .....	16
1.3 KOMBINOVANÉ AKTIVNÍ FILTRY.....	16
<b>2. UVEĎTE ZÁKLADNÍ MOŽNOSTI ZAPOJENÍ FILTRŮ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ</b> .....	<b>17</b>
2.1 ZAPOJENÍ PARALELNÍCH AKTIVNÍCH FILTRŮ.....	17
2.2 ZAPOJENÍ SÉRIOVÝCH AKTIVNÍCH FILTRŮ.....	18
2.3 DALŠÍ MOŽNOSTI ZAPOJENÍ PARALELNÍCH A SÉRIOVÝCH AKTIVNÍCH FILTRŮ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ.....	20
<b>3. UVEĎTE ZÁKLADNÍ MOŽNOSTI ŘÍZENÍ AKTIVNÍCH FILTRŮ</b> .....	<b>21</b>
a) <i>P-Q teorie</i> .....	21
b) <i>D-Q-0 teorie</i> .....	22
c) <i>Porovnání metod</i> .....	22
<b>DALŠÍ MOŽNOSTI ELIMINACE HARMONICKÝCH</b> .....	<b>23</b>
<b>ZÁVĚR A REKAPITULACE</b> .....	<b>24</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>25</b>

**Seznam použitých indexů**

*h* – efektivní hodnota *h*-té harmonické

*h%* – efektivní hodnota *h*-té harmonické vyjádřená v procentech

*s* – napětí/proud sítě

*F* – napětí/proud aktivním filtrem

*l* – napětí/ proud zátěže

*f<sub>c</sub>* – napětí na kondenzátoru

*V<sub>af</sub>* – napětí na vazebním transformátoru

*L* – indukčnost

*x<sub>n</sub>* – napětí fázová

*c/c<sub>x</sub>* – napětí/proudy kompenzační

*x<sub>r</sub>/x<sub>ref</sub>* – napětí/proudy referenční

pozn.: kde *x* označuje fáze *a*, *b*, *c*

## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je rešerší na téma základní problematiky aktivních filtrů. Cílem práce je poskytnout čtenáři přehled o používaných typech aktivních filtrů a jejich využití zejména v energetice. Aktivní filtry jsou speciálně řízené měniče konkrétně střídače napětí resp. proudu. Pro spolehlivou kompenzaci vyšších harmonických v síti musí obsahovat velmi výkonnou výpočetní jednotku, která téměř bez časového zpoždění musí reagovat na aktuální výskyt vyšších harmonických složek v síti přes měřicí transformátory příp. Hallovy snímače. To je činní oproti „normálním“ měničům jako velmi drahá řešení a tak je nutné, při použití aktivního filtru zvážit zdali, by v našem případě nestačilo použít jiné řešení.

V případě paralelních aktivních filtrů, jejichž základní funkce je v této práci zmíněna je třeba se nejprve rozhodnout, pokud by v našem konkrétním případě nestačilo použít filtr paralelní laděný pasivní. Jedná se o kombinaci indukčnosti v sérii s kapacitou, celé připojené paralelně ke kompenzovanému vedení. Těchto filtrů můžeme paralelně k síti připojit několik, každý je naladěn na určitou dominantní harmonickou, pro kterou se chová téměř jako zkrat. Pasivní filtry jsou dnes již velmi levná a zavedená řešení, ale mají také své nevýhody. Hlavní nevýhodou je to, že filtr postupem času a elektrickým namáháním stárne, tudíž mění svoje vlastnosti. Dalším nebezpečím u pasivních filtrů je možnost rezonance s impedancí sítě a vzniku vysokých napětí, která poškodí izolace. Pasivní filtr funguje jen v předem zvolených podmínkách. Naproti tomu aktivní filtr lze daným podmínkám přizpůsobit použitím vhodného řídicího algoritmu. Paralelní aktivní filtry a laděné pasivní filtry tedy odstraňují rušení ze strany spotřebitele.

Sériové aktivní filtry se používají jako kondicionéry k úpravě napětí v energetice na sítích NN. V místě, kde impedance vedení způsobuje velký úbytek napětí, použijeme linkový kondicionér. Kondicionér odebírá ze strany zdroje činný výkon, ale na stranu spotřebitelů zkvalitní dodávku elektrické energie.



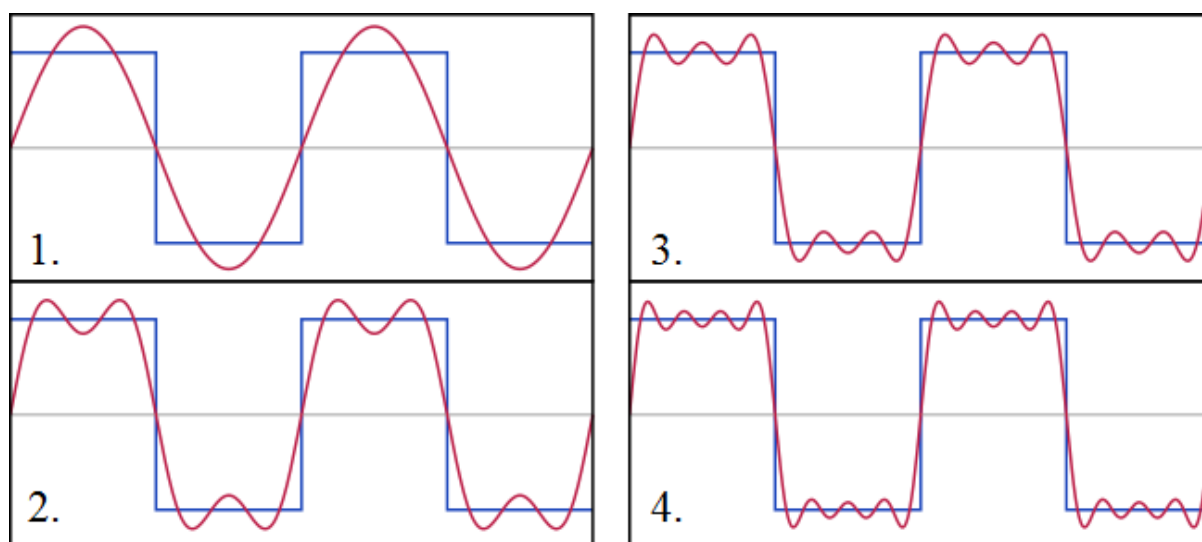
## 1. Popište základní typy aktivních filtrů a jejich funkci.

Aktivní filtry jsou napájeny z kompenzovaného vedení především pro pokrytí ztrát spínacích prvků. Účinnost aktivního filtru, která je dána parametry použitých součástek, se pohybuje v rozmezí 93 – 97% [2]. Měníče v aktivních filtrech pracují v usměrňujícím i střídačovém chodu a jsou řízeny pulzní šířkovou modulací. Realizaci aktivních filtrů umožnil vývoj spínacích prvků, které jsou schopny spínat s vysokým kmitočtem a zároveň vypínat bez pomocných komutačních obvodů. Aktivní filtry se podle způsobu připojení na kompenzovanou síť dělí na paralelní aktivní filtry, sériové aktivní filtry a kombinované aktivní filtry.

Aktivní filtry se tedy používají ke kompenzaci vyšších harmonických proudů a úpravám napětí. Vyšší harmonické elektrickou síť znečišťují a způsobují problémové fungování ostatních spotřebičů. Viditelnými příznaky jsou například blikající osvětlovací tělesa. Nebezpečnější jsou ale příznaky, které nejsou na první pohled postřehnutelné. Výsledkem je například kondenzátor, který náhle vlivem přetížení explodoval. Dalšími ohroženými prvky sítě jsou transformátory, kabely, motory a mnoho dalších. Speciálně u točivých elektrických strojů může dojít kromě k poškození izolace také k mechanické rezonanci v rotoru, motor pak vibruje a je hlučný.

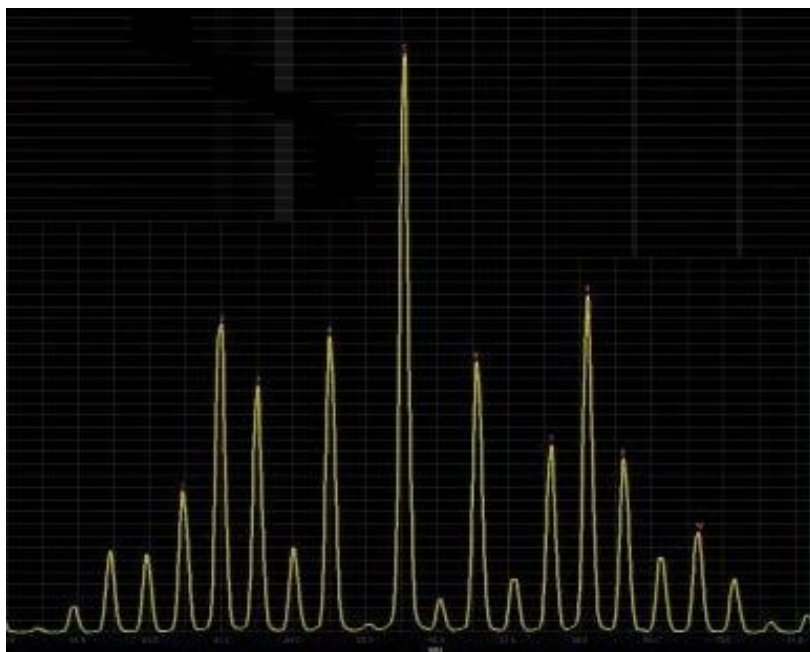
Pro zjištění obsahu vyšších harmonických v síti je nejprve nutné provést analýzu průběhů napětí a proudu v síti. Toto se provádí Fourierovým rozvojem (transformací) vzorku průběhu na určitém intervalu ve Fourierovu řadu (toho využívají také algoritmy aktivních filtrů, více v kap. 3.1). Jednotlivé vyšší harmonické složky se sčítají a tvoří výsledný neharmonický průběh, výsledkem je tedy suma sinových a kosinových průběhů, každý s rostoucím kmitočtem, který je násobkem celého čísla. Existují ale i takové harmonické, jejichž frekvence není násobkem celého čísla, a ty se nazývají mezi harmonické složky.

Další obrázek demonstruje nasčítávání vyšších harmonických složek na neharmonický průběh do řádu 4.



[obr. 1. Analýza obdélkového průběhu do řádu 4 [15]]

Pokud již máme neharmonický průběh rozložený na řadu, zakresluje spektrum signálu. Spektrum signálu zobrazuje závislost velikosti jednotlivých amplitud vyšších harmonických průběhů na rostoucím kmitočtu. Dle velikosti jednotlivých „špiček“ určujeme nedominantnější vyšší harmonické složky, které je třeba eliminovat, tedy složky na které naladíme pasivní laděné filtry nebo složky kompenzované aktivním filtrem.



[obr. 2 Spektrum signálu [14]]

K posouzení velikosti harmonické je zavedena podílová hodnota  $h$ -té harmonické. Ta je definována jako podíl efektivní hodnoty  $h$ -té ku první harmonické. Platí jak pro napěťové tak pro proudové harmonické a hodnoty jsou udány v procentech.

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} [\dots] \qquad u_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} * 100 [\%] \qquad (1)$$

$$i_h = \frac{I_h}{I_1} [\dots] \qquad i_{h\%} = \frac{I_h}{I_1} * 100 [\%] \qquad (2)$$

K posouzení obsahu harmonických v celém spektru se zavádí celkový činitel harmonických THF a celkové harmonické zkreslení THD. Definice obsahují všechny harmonické v celém spektru, kde již tvar průběhu napětí (proudu) není periodický.

$$THD_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (3)$$

$$THF_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U} \quad THF_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I} \quad (4)$$

Pokud se uvedené vztahy stáhnou k normě [2], pak se činitel a celkové harmonické zkreslení vyjádří:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{U_1} \quad (5)$$

$$THF_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U} \quad THF_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I} \quad (6)$$

Pozn.: Vztahy pro rozvoj funkce ve Fourierovu řadu na intervalu, funkce musí být na intervalu po částech spojitá.

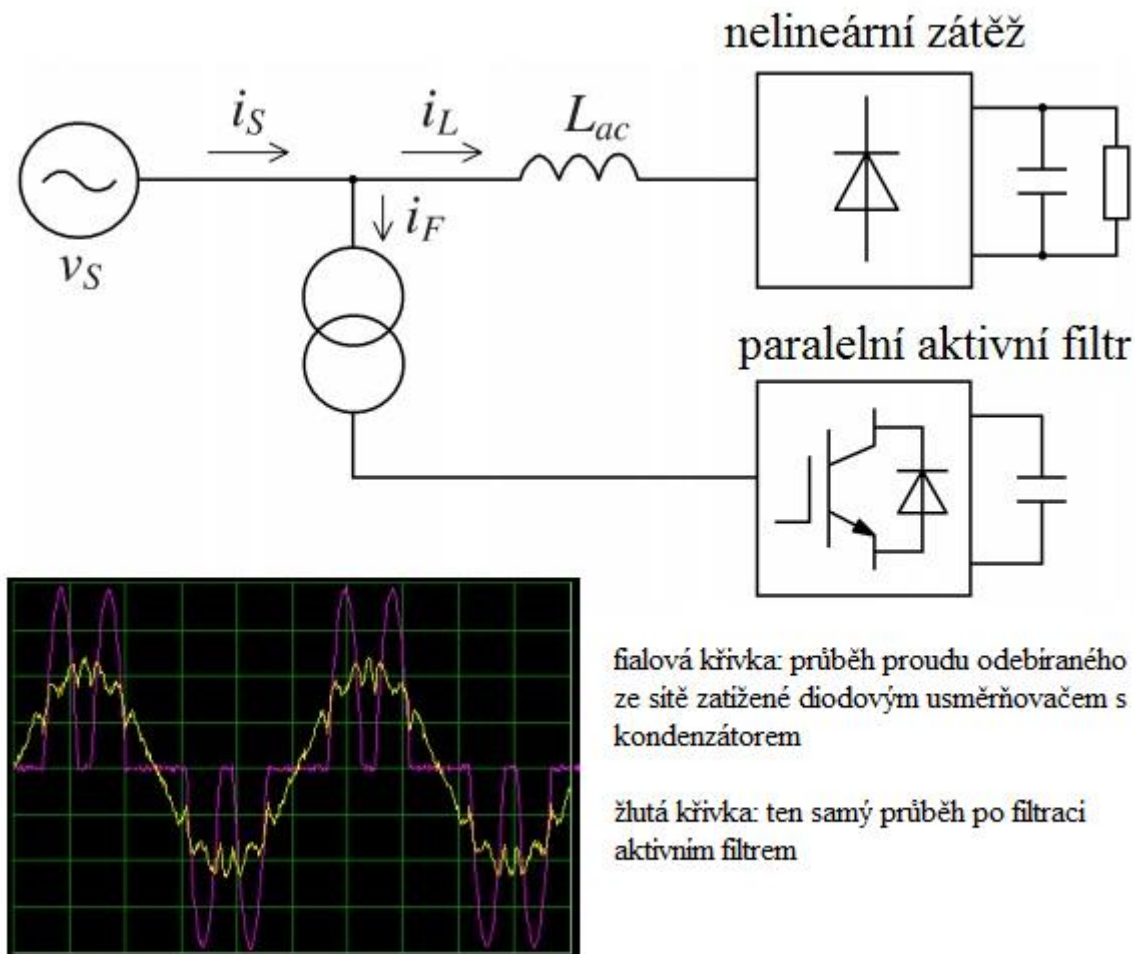
$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n * \cos(n\omega t) + b_n * \sin(n\omega t)] \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} * \int_0^T f(t) dt \quad (8)$$

$$a_n = \frac{2}{T} * \int_0^T f(t) * \cos(n\omega t) dt \quad (9)$$

$$b_n = \frac{2}{T} * \int_0^T f(t) * \sin(n\omega t) dt \quad (10)$$

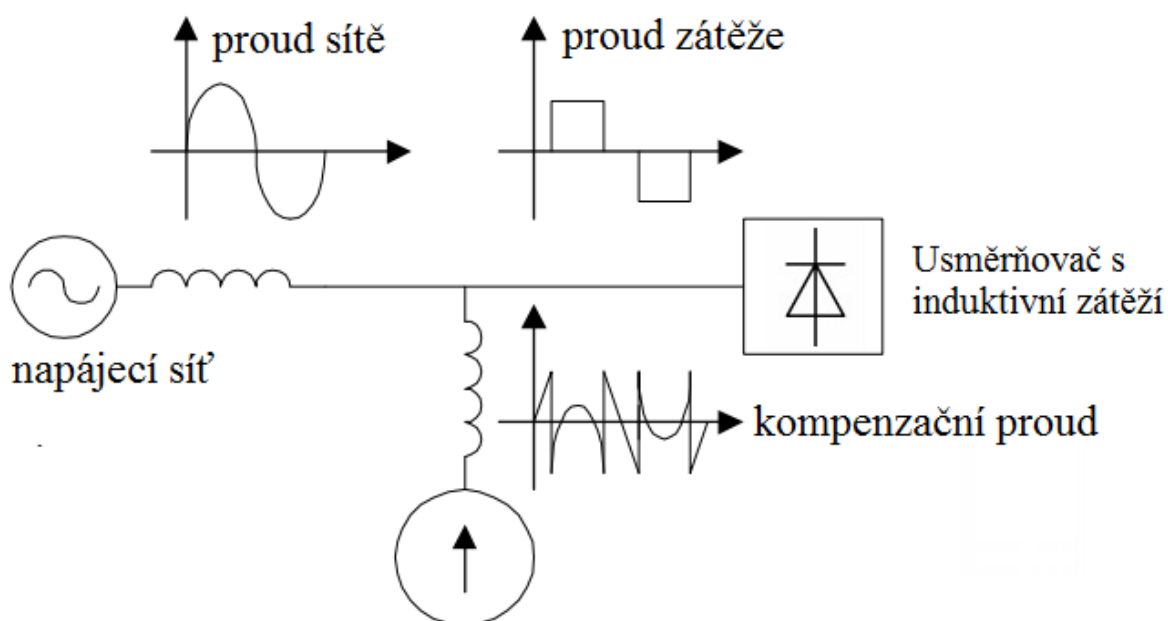
## 1.1 Paralelní aktivní filtry



(obr. 3 Paralelní aktivní filtr [7], [12])

Funkce paralelních aktivních filtrů je založena na odečtení základní - 1. harmonické složky proudu od celkového neharmonického průběhu na tzv. zbytkovou křivku. Řídící jednotka poté provede inverzi této zbytkové křivky a měnič (napět'ový střídač) začne vyrábět požadovaná napětí. Vyráběné napětí tvoří rozdíly mezi napětím měniče a napětím sítě na vazebním filtru, a tím je vyvoláván kompenzační proud. Tímto filtrem lze upravovat deformace napětí na zátěži, zvyšovat účinek kompenzací jalové složky proudu a lze také symetrizovat odběr proudů. Jalová složka je vyměňována mezi aktivním filtrem a zátěží. Všechny uvedené vlastnosti závisí na řídicím algoritmu a výkonu řídicí jednotky. Paralelní aktivní filtr je se sítí spojen pomocí vazebního pasivního filtru, protože sám měnič aktivního filtru je zdrojem harmonických, filtr je typu LC dolní propust.

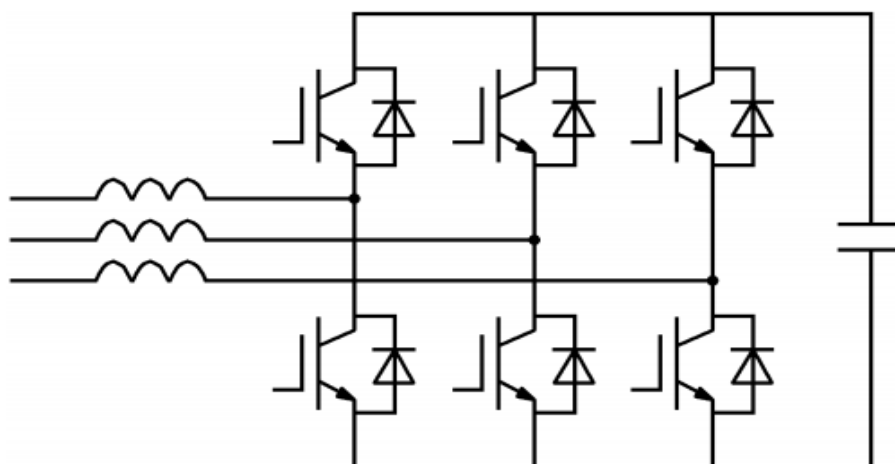
Funkce paralelního aktivního filtru:



(obr. 4 Funkce paralelního aktivního filtru [6])

Paralelní aktivní filtry se dělí na dva druhy. Prvním druhem je paralelní aktivní filtr s napěťovým zdrojem.

#### a) Paralelní aktivní filtr s napěťovým zdrojem



(obr. 5 Měničová část paralelního aktivního filtru s napěťovým zdrojem [7])

Měnič pracuje ve dvou režimech, kondenzátor je dobíjen výměnou jalového výkonu mezi zátěží a aktivním filtrem. Tedy měnič pracuje jako střídač a jako usměrňovač. Napětí na kondenzátoru je parametrem řídicího systému filtru, musí splňovat následující rovnici vzhledem k efektivní hodnotě fázového napětí sítě [9]:

$$U_{fc} \geq \sqrt{2} * \sqrt{3} * U_s \quad (11)$$

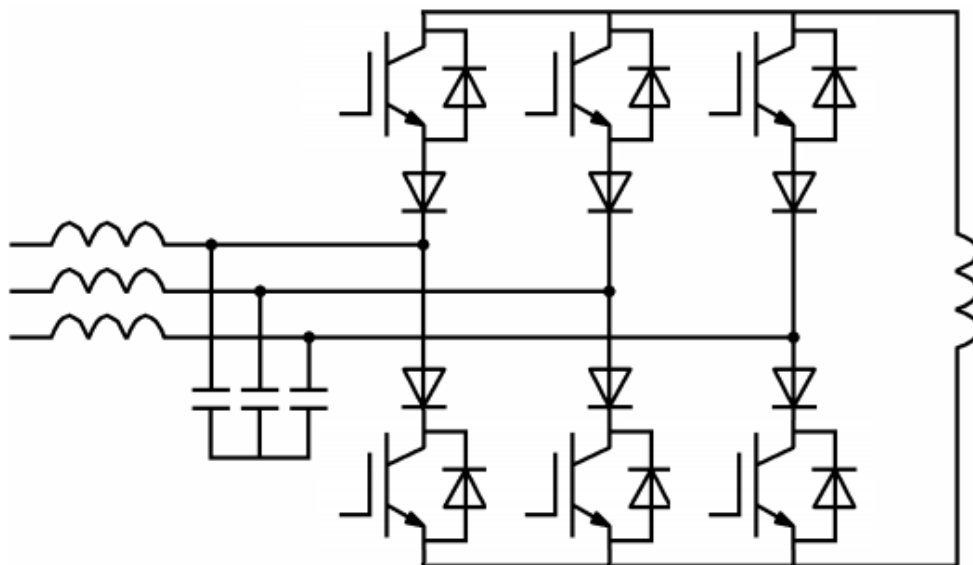
Na indukčnostech na vstupu střídače vzniká rozdíl síťového napětí a napětí měniče, tím je vyvolán nárůst a pokles proudů do měniče, aby oscillovaly kolem požadovaných průběhů.

Tento typ paralelního aktivního filtru je z ekonomických důvodů nejpoužívanější a dosahuje mnohem menších rozměrů než paralelní aktivní filtr s proudovým zdrojem.

Tento typ aktivního filtru může pracovat také v síti se středním pracovním vodičem. Pokud jsou na síť připojeny nelineární zátěže (například zářivkové soustavy s elektronickými předřadníky, nebo UPS záložní zdroje), pak se harmonické objevují také v nulovém vodiči a pomocí tohoto filtru je lze odstranit. Měnič má jednu větev se dvěma IGBT tranzistory a dvěma antiparalelními diodami navíc, mezi něž je střední pracovní vodič připojen. Tento typ aktivního filtru existuje též v jednofázové variantě.

Druhým typem paralelního aktivního filtru je paralelní aktivní filtr s proudovým zdrojem.

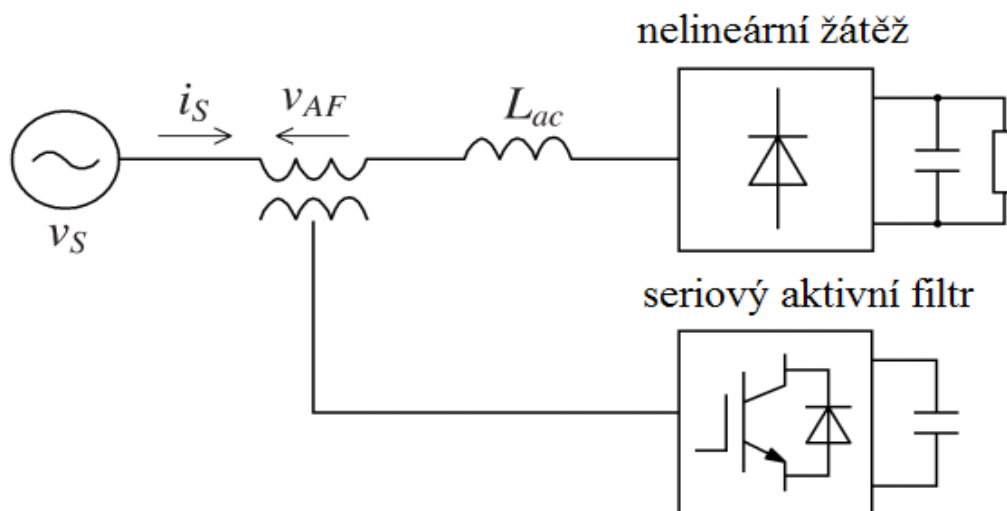
#### b) Paralelní aktivní filtr s proudovým zdrojem



(obr. 6 měničová část paralelního aktivního filtru s proudovým zdrojem [7])

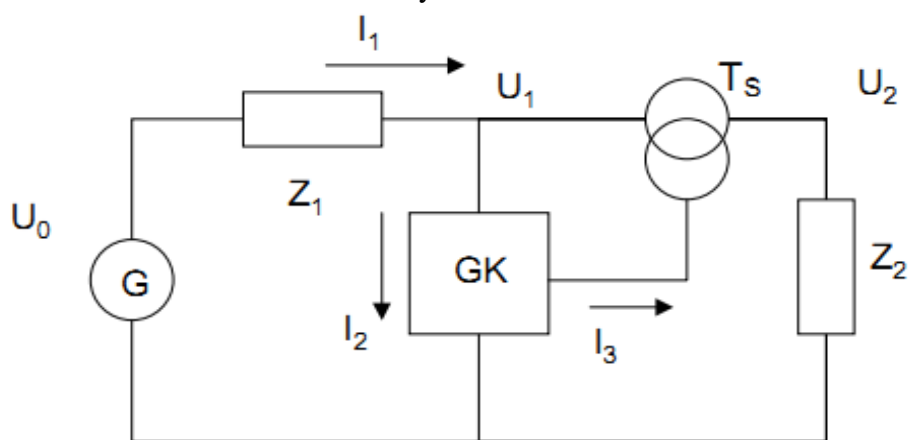
Tento typ aktivního filtru obsahuje jako zdroj proudu indukčnost a měničem je proudový střídač. Měnič je v jednom intervalu v režimu usměrňovače a indukčnost tak akumuluje energii do sebe. V druhém intervalu je proud z indukčnosti uzavírán do zátěže, pro střídání těchto dvou intervalů je použita PWM modulace. Vhodným střídáním intervalů je dosaženo kompenzace.

## 1.2 Sériové aktivní filtry



(obr. 7 Sériový aktivní filtr [7])

Jedná o aktivní filtr napěťového typu. Tento filtr tedy kompenzuje poklesy, špičky, symetrizuje napájení a upravuje amplitudu napětí, odstraňuje harmonické (pro vyšší harmonické proudy tvoří vysokou impedanci). Tento filtr neumožňuje práci s amplitudou proudu, proto se používá ve spolupráci s filtrem (aktivním i pasivním) paralelním, viz 1.3 kombinované aktivní filtry.



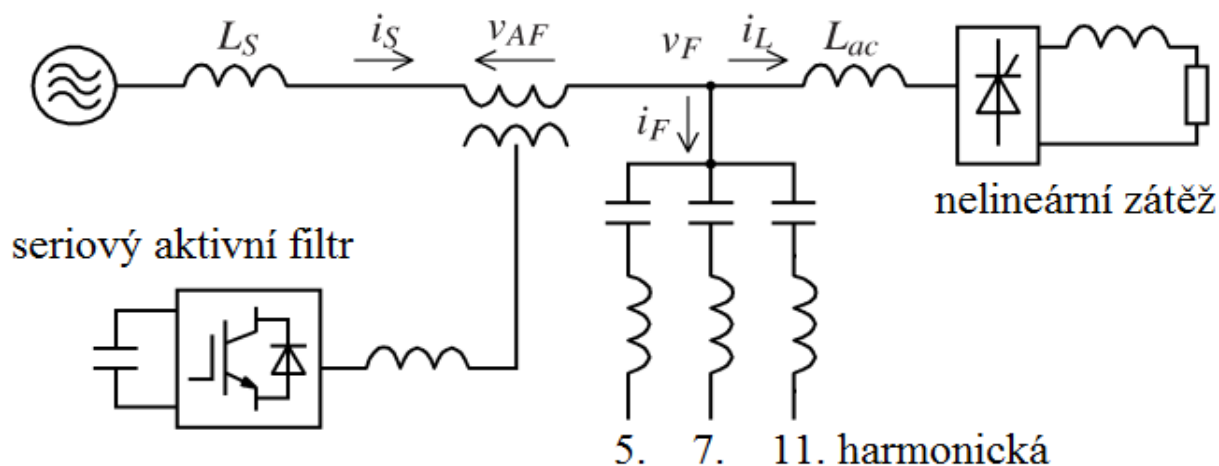
(obr. 8 Princip sériového aktivního filtru [8])

Princip sériového aktivního filtru spočívá v jeho funkci přidavného řízeného zdroje napětí k napětí sítě, ke které je připojen, výsledné napětí na zátěži je součtem napětí sítě a napětí filtru. Sériový aktivní filtr může být napájen z kompenzované sítě nebo z přidavného nezávislého zdroje. V případě napájení z kompenzované sítě jsou fyzikální limity filtru v poklesu amplitudy napětí sítě o více jak 30% [11], dále už není filtr pokles schopen kompenzovat a dojde ke kolapsu zařízení. V případě napájení z nezávislého zdroje může sériový aktivní filtr sloužit také jako náhradní zdroj v případě výpadku sítě. Sériový aktivní filtr může mít také jako paralelní aktivní filtr zdroj napěťový i proudový.

### a) Sériový aktivní filtr s napěťovým zdrojem

Zdrojem napětí je stejnosměrný obvod, který napájí tři jednofázové napěťové střídače (nebo jeden třífázový). Tyto střídače napájí přes vyhlazovací a odrušovací LC filtr primární vinutí transformátorů, jejichž sekundární vinutí jsou sériově zapojena ke každé fázi sítě. Tyto transformátory mohou být zapojeny do hvězdy i trojúhelníka. Měniče jsou řízeny PWM modulací. Příkladem takového sériového aktivního filtru je Linkový kondicionér používaný na výběžcích sítí nízkého napětí.

### 1.3 Kombinované aktivní filtry



(obr. 9 Kombinovaný aktivní filtr [7])

Tento typ filtru se používá v kombinaci s pasivními filtry pro zlepšení jejich vlastností. Sériová aktivní část filtru je schopna kompenzovat napěťové nesymetrie a poruchy. Pasivní část je zapojena paralelně k síti a je tvořena pasivními LC filtry naladěnými na určité dominantní harmonické složky (pro tyto složky se chovají jako zkrat) ve spektru proudu odebíraného zátěží. Tento typ filtru neumí kompenzovat účinník  $\cos \varphi$ .



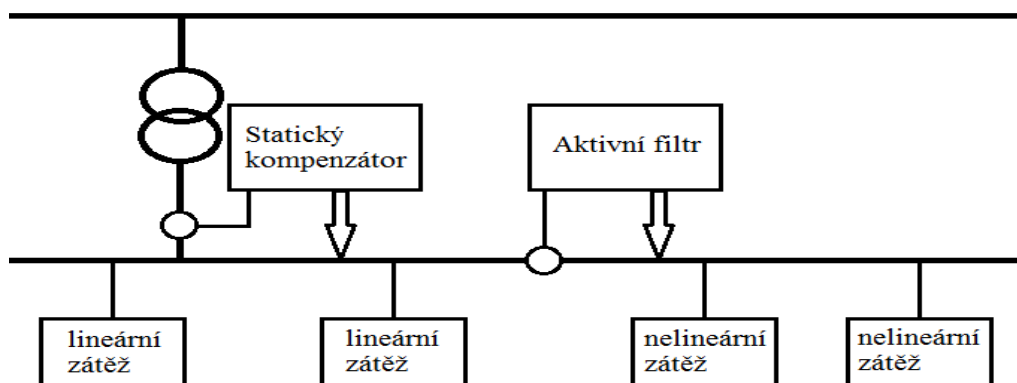
## 2. Uved'te základní možnosti zapojení filtrů v distribuční soustavě.

### 2.1. Zapojení paralelních aktivních filtrů

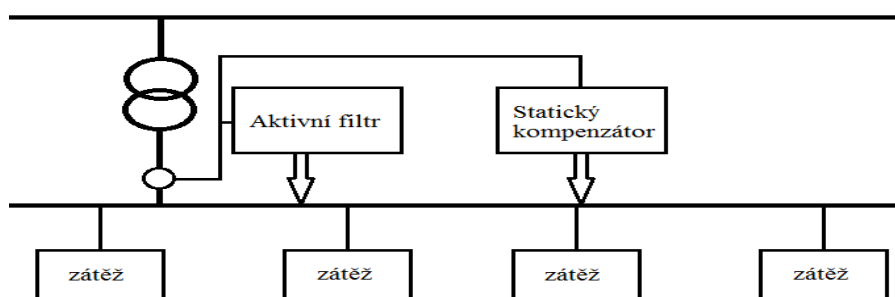
Paralelní aktivní filtry v distribuční síti upravují neharmonický proud od spotřebitelů připojených na společnou sběrnici k jednomu zdroji. Zapojují se mezi spotřebitele a zdroj, kterým je distribuční transformátor. Používané výkony jsou od desítek kVA do jednotek MVA. Distribuční soustavou může být také rozvod elektrické energie v rámci průmyslového závodu, kde pracují usměrňovače, cyklokonvertory nebo jiná zařízení, která způsobují rušení.

Paralelní aktivní filtr může zvyšovat účinník v takové síti kompenzací jalové složky proudu a zlepšit hodnoty flikru (blikání světelných spotřebičů vlivem vyšších harmonických). Také se používá v součinnosti se statickým kompenzátorem, kde statický kompenzátor reguluje účinník v hrubých skocích spínáním jednotlivých kondenzátorových stupňů a aktivní filtr provádí dokompenzování na přesnou hodnotu  $\cos \varphi$ . Statický kompenzátor může pracovat samostatně, nebo může být řízen aktivním filtrem, přičemž spínání kondenzátorových stupňů probíhá tyristorově.

Existují dva způsoby, jak může paralelní aktivní filtr kompenzovat.



[obr. 10 Zapojení skupinové filtrace paralelním aktivním filtrem [2]]

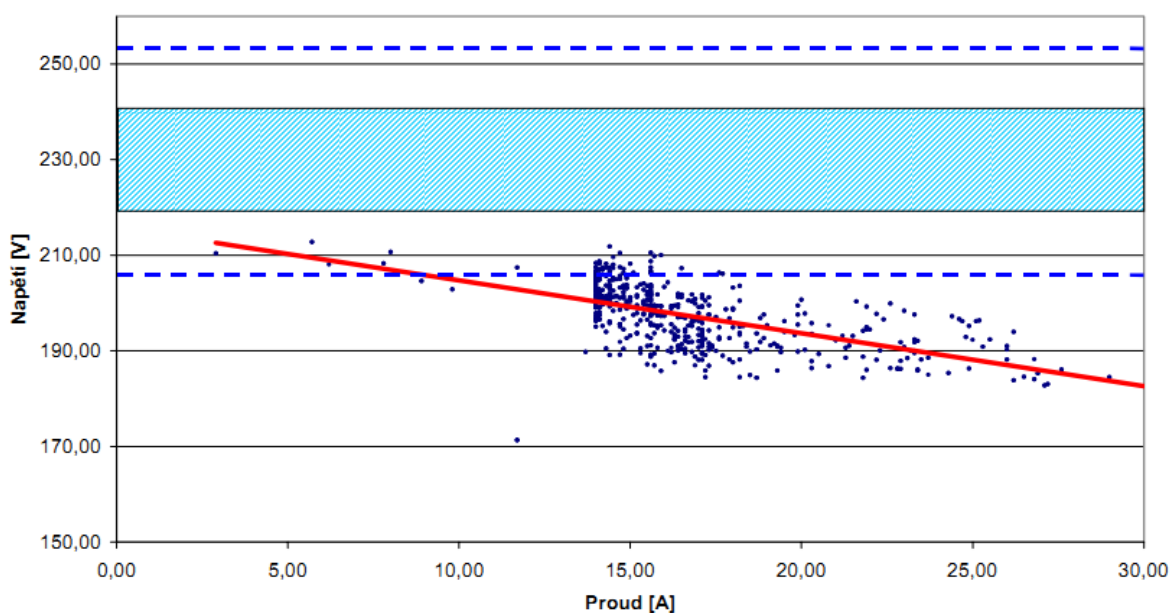


[obr. 11 Zapojení centrální filtrace paralelním aktivním filtrem [2]]

## 2.2. Zapojení sériových aktivních filtrů

Sériové aktivní filtry se používají pro úpravu napěťových poruch. Největší uplatnění nacházejí na výběžcích sítí nízkého napětí, kde do sítě pronikají vyšší harmonické od jednotlivých spotřebitelů (mikrovlnné trouby nebo například zářivková osvětlovací tělesa s elektronickými předřadníky) a ještě dochází k úbytkům napětí vlivem nerovnoměrného náhlého odběru a na odporu vedení. Vyráběné výkony jsou v desítkách kVA, a v úvahu přicházejí také zařízení s výkonem kolem 100 kVA [8]. Takové zařízení se pak nazývá linkový kondicionér a místo jeho použití na síti nízkého napětí se posuzuje následujícím způsobem. Vycházíme ze závislosti proudu na napětí v místě předpokládané instalace kondicionéru.

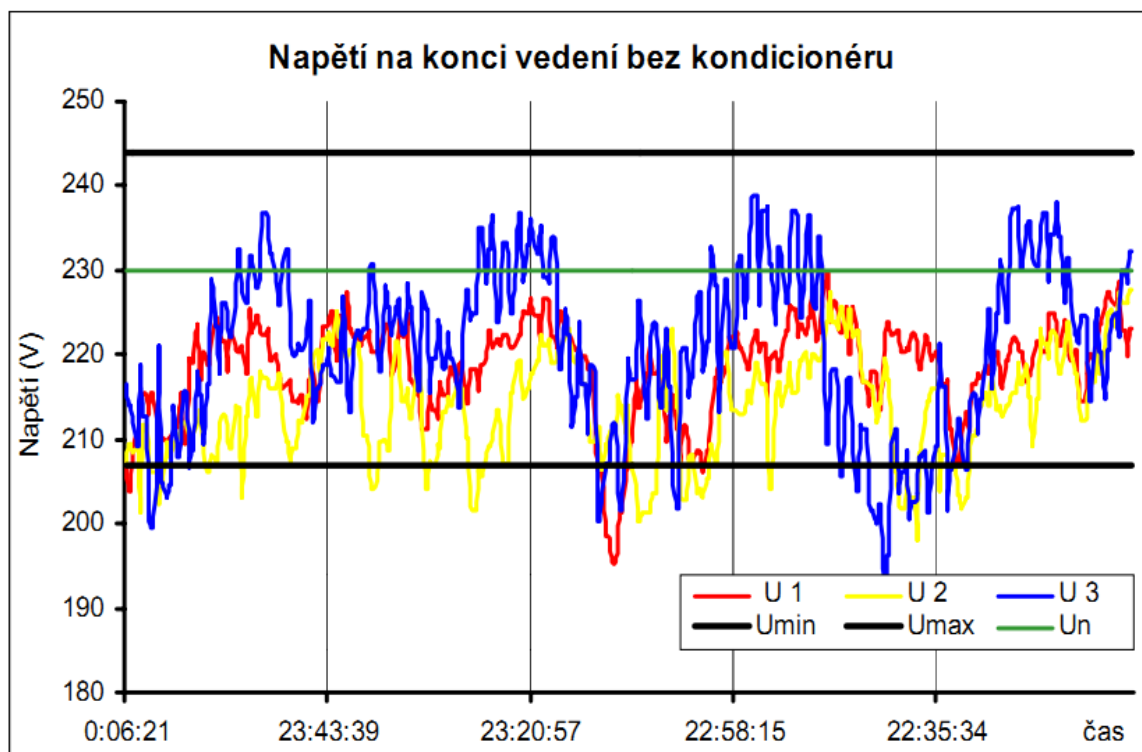
Závislost napětí na proudu ve výběžku sítě



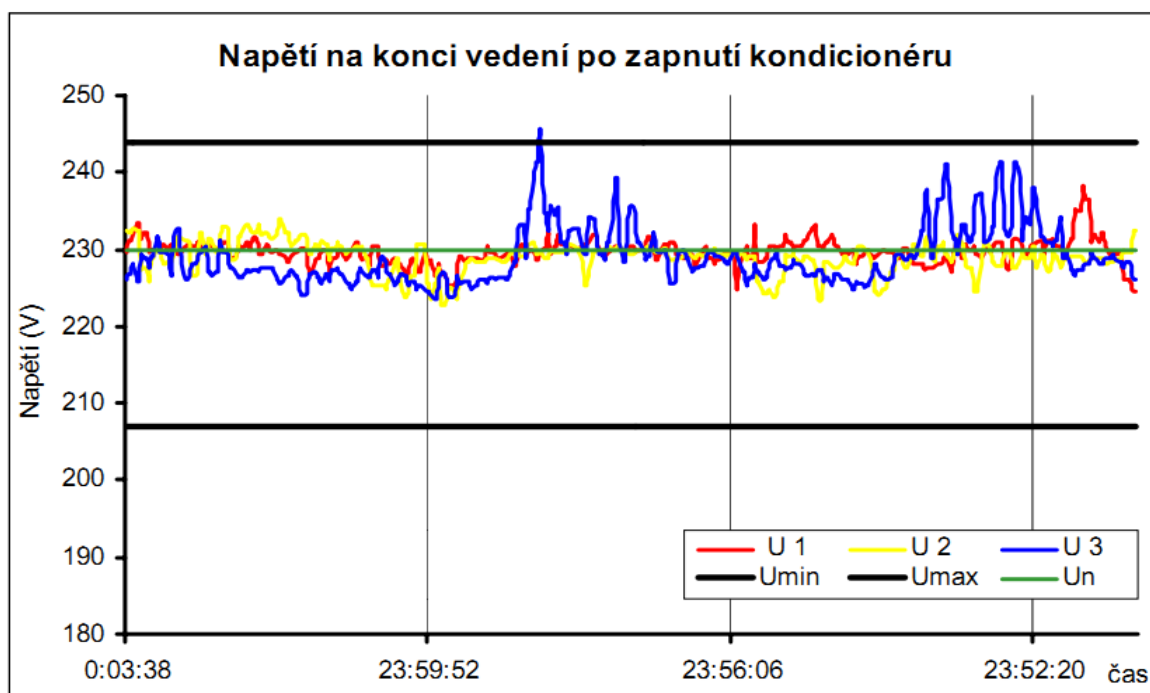
[obr. 12 Závislost proudu na napětí v místě předpokládané instalace kondicionéru [10]]

Cílem kondičiačního zařízení je dostat červenou křivku napětí do vyšrafované modré oblasti i při větším a náhodném odběru proudu, který charakterizují modré body, což je statistický rozptyl náhodných odběrů (také například rozběhy elektromotorů praček apod.). Funkce sériového aktivního filtru s napěťovým zdrojem je popsána v kapitole 1.2.1.

Následující obrázky ukazují průběhy napětí na výběžku sítě NN bez zapnutého a se zapnutým kondičiačním zařízením.



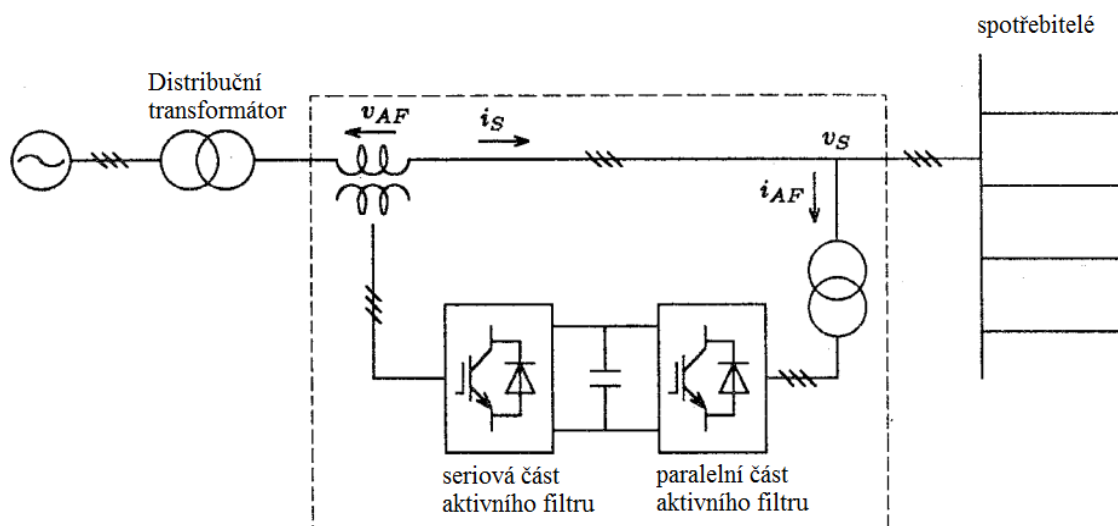
[obr. 13 Napětí na výběžku sítě s vypnutým kondicionérem [10]]



[obr. 14 Napětí na konci vedení po zapnutí kondicionéru [10]]

### 2.3. Další možnosti zapojení paralelních a sériových aktivních filtrů v distribuční soustavě

Tento způsob zapojení má na společný stejnosměrný obvod zapojený společně dohromady paralelní aktivní i sériovou aktivní část. Obě části jsou řízeny stejnou řídicí jednotkou a výsledný systém dokáže aktivně regulovat jak proudové, tak napěťové vyšší harmonické i nesymetrie. Jedná se však o velmi drahé řešení, které se nevyužívá a aktivní paralelní část je hrazena pasivním filtrem.



[obr. 15 Kombinace paralelního a sériového aktivního filtru [5]]

### 3.1. Uved'te základní možnosti řízení aktivních filtrů.

Paralelní aktivní filtr kompenzující vyšší harmonické proudy odstraňuje všechny vyšší harmonické, protože jeho princip vychází ze zbytkové křivky. V pásmu vyšších harmonickým proudů jsou též zahrnuty sudé a mezilehlé harmonické. Maximální harmonické, kterou je filtr schopen kompenzovat, závisí jednak na vazebním filtru mezi měničem a sítí a jednak na vzorkovací frekvenci řídicího algoritmu aktivního filtru. Platí, že tím vyšší řád harmonické, tím se schopnost filtru přesněji kompenzovat snižuje [2].

Sériový aktivní filtr upravuje napětí na zátěži, pro vyšší harmonické se chová jako vysoká impedance.

Řídicí jednotkou aktivních filtrů je digitální signálový procesor opatřený vnějšími analogovými obvody pro úpravu výstupů z Hallových snímačů a měřících transformátorů. Analogovými obvody jsou A/D převodníky pro následující zpracování signálu v číslicové podobě a ochranné obvody.

Řízení aktivních filtrů můžeme provádět dvojím způsobem. Jedním je řízení v časové oblasti (pracuje s okamžitými hodnotami výkonů nebo proudů a je výpočetně méně náročné) jedná se o P-Q a D-Q-0 teorii. Nebo může řízení probíhat ve frekvenční oblasti a to je založeno na Fourierově transformaci, diskrétní DFT i rychlé Fourierově transformaci FFT. Zde je ale nutné použít rychlý výpočetní systém. Diskrétní Fourierova transformace se používá pro analýzu již navzorkovaného signálu.

#### a) P-Q teorie

P-Q teorie též vektorové řízení se v oblasti aktivních filtrů používá na úrovni počítačových simulací, nejvýše však v laboratorních podmínkách. P-Q teorie pracuje s okamžitými hodnotami měřených proudů a napětí tak, že je transformuje z fázových souřadnic do p-q komplexní roviny (Clarkova transformace), kde p je reálná (činný výkon) a q jalová část výkonu v trojfázové síti s nulovým vodičem i bez něj. Transformace probíhá následujícím způsobem:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

Poté řídicí jednotka odečte činný výkon první harmonické od celkového činného výkonu vyšších harmonických složek proudu, provede inverzi výsledku a zpětnou Clarkovou transformací vypočte kompenzační proudy fázové.

**b) D-Q-0 teorie**

D-Q-0 je opět matematická transformace sloužící ke zjednodušení analýzy třífázových obvodů. Pomocí této transformace převedeme fázové proudy v třífázovém systému na dva vektory. Jeden vektor představuje proud základní harmonické a druhý proud zátěže. Rozdílem těchto vektorů a zpětnou transformací získáme kompenzační proudy.

Matematicky probíhá transformace následujícím způsobem:

$$I_{dq0} = T I_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

**c) Porovnání metod**

Rozdíl mezi P-Q teorií a D-Q je, že P-Q teorie pracuje s výkony a D-Q teorie pracuje přímo s proudy. Více jsem se teorií řízení aktivních filtrů nezabýval.

## Další možnosti eliminace harmonických

Jednou z dalších možností eliminace harmonických u nepřímých měničů kmitočtu je zvětšení počtu fází vstupního usměrňovače. Například použít střídač s dvanácti pulzním vstupním usměrňovačem. Použitím dvanácti pulzního usměrňovače odpadají některé liché harmonické, které jsou u šesti pulzních zapojení velmi výrazné, například 3. harmonická. Použitelné například v průmyslových závodech v kombinaci s pasivními filtry. Je sice potřeba použít transformátor s dvěma sekundárními vinutími, ale cena takového řešení nemusí dosahovat ceny aktivního filtru.

Pokud vyšší harmonické proudy odebírá řízený usměrňovač, je možné zařadit těchto usměrňovačů do série několik s postupnou změnou úhlu řízení. První usměrňovače bude mít nejmenší úhel řízení, protože řízený usměrňovač odebírá největší jalový výkon při úhlu řízení 90 stupňů.

## Závěr a rekapitulace

Uvedené možnosti eliminace vyšších harmonických proudů jsou: pasivní filtry-zavedená a levná řešení, více pulzní technologie u nepřímých měničů kmitočtu poměrně levné a účinné řešení v kombinaci s vyhlazovacími tlumivkami například pro průmyslový závod, sériové řazení řízených usměrňovačů a v této práci základním způsobem popsané aktivní výkonové filtry.

Vzhledem k vlastnostem pasivních filtrů- degradují stárnutím, možnost rezonance se sítí a vznik vysokých napětí bych pasivní filtry použil v případě kompenzace harmonických od diodových usměrňovačů.

Dvanácti pulzní technologii bych použil pro průmyslový závod s nepřímými měniči kmitočtu pracujícími s výkonem v řádu stovek kilowatt. Každý měnič na vstupní straně obsahuje vyhlazovací dolní propust v podobě tlumivky.

Vynechám-li řízený usměrňovač řídící stejnosměrný motor, zbývají ještě výkonové aktivní filtry, jejichž základními principy se práce zabývá. Úkolem práce je podat čtenáři informaci o tom v jakém případě aktivní filtry použít. Došel jsem tedy závěru, že paralelní aktivní filtr pro úpravu proudu a jalového výkonu bych použil na výkony v rámci distribuční soustavy. Další možné použití je v případě měření pro trolejová trakční vedení. Sériové aktivní filtry i přesto, že vyšší harmonické proudy izolovat umí, bych použil na úpravu napětí na sítích nízkého napětí. Sériové aktivní filtry umí provádět izolaci harmonických proudů do určité hodnoty dané normou zároveň s úpravami napětí to, ale je vyžaduje složité řízení a může znamenat vyšší cenu filtračně kompenzačního zařízení.



## Použitá literatura

- [1] Kůs V.: „Elektrické pohony a výkonová elektronika“, Vydavatelství ZČU, Plzeň 2005
- [2] Kůs V.: „Nízkofrekvenční rušení“, Vydavatelství ZČU, Plzeň 2003
- [3] Kůs V.: „Vliv polovodičových měničů kmitočtu na napájecí soustavu“, BEN, Praha 2002
- [4] João A., Carlos C., Júlio M.: „Active filters with control Based on the p-q Theory“, IEEE 2000
- [5] Hirofumi A., „New Trends in Active Filters for Power Conditioning“, IEEE 1996
- [6] Luis A., Juan W., José R., Rogel R.: „Using active filters to improve power quality“
- [7] Akagi H.: „Modern active filters and traditional passive filters“, Tokyo Institute of Technology, 2006
- [8] Korenc V., Matoušek Z., Petrů C.: „Linkové kondicionéry a jejich užití“, ELCOM, 2000
- [9] Brandštetter P.: „Aktivní výkonové filtry“, VŠB – TUO, Ostrava 2005
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Dqo\\_transformation](http://en.wikipedia.org/wiki/Dqo_transformation)
- [11] <http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/145-linkovy-kondicioner.html>
- [12] <http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/146-Aktivni-filtry---obecne.html>
- [13] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=27733](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27733)
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum\\_analyzer](http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer)
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier\\_series](http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_series)