

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Bakalárska práca

**Porovnanie zapojení pasívnych rezonančných filtrov vyšších
harmonických**

Samuel Šárpataky

Vedúci projektu: Ing. Martin Čerňan – FEL ČVUT v Prahe

Študijný program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management

2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Šárpataky Samuel**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Porovnanie zapojení pasívných rezonančních filtrů vyšších harmonických

Pokyny pro vypracování:

1. Požadavky na kvalitu elektrické energie, princip obmedzenia vyšších harmonických.
2. Popis používaných zapojení filtrů.
3. Technické a ekonomické hodnotiace kritéria.
4. Návrh filtračno-kompenzační stanice s roznyim zapojením filtrů.
5. Porovnanie zapojení filtrů filtračno-kompenzačních stanic.

Seznam odborné literatury:

1. Arrillaga, J., Watson, N.R.: Power System Harmonics, 2003, John Wiley @ Sons, Ltd.
2. Tlustý, J. a kol.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích.
3. ČSN EN 50160.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Čerňan

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2015

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe dňa

.....

Meno Priezvisko

Pod'akovanie

Ďakujem Ing. Martinovi Čerňanovi za vedenie mojej bakalárskej práce a za prístup pri jej vedení.

Abstrakt

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo popísať problematiku rušenia v sieti spôsobeného vyššími harmonickými, spracovať vzťahy pre návrh jednotlivých filtrov a následne navrhnúť riešenie tohto problému pre oblúkovú pec v dvoch variantách. Následne tieto varianty porovnať na základe technických a ekonomických kritérií. Na výpočet technickej stránky a návrhu bol použitý software Wolfram Mathematica 10.0, v ktorom boli vykonané všetky výpočty a grafické zobrazenia. Na vypracovanie ekonomického zhodnotenia bol použitý software MS Excel, pomocou ktorého sme porovnali tieto dve varianty. Hodnoty pre výpočet boli stanovené na základe meraní v podobnom zariadení.

Abstract

The goal of the bachelor's degree project was to describe the problematics of interference in electrical system caused by harmonics, process the terms of individual filters and design a solution of this problem on arc furnace in two different variations. Then build a comparison of these variants based on technical and economical criterions. For calculation and design of the technical side we used software Wolfram Mathematica 10.0, in which we made all calculation and graphical outputs. For designing of economical comparison we used software MS Excel, by which we compared these 2 variants economically. The values of inputs for calculations were stated based on measurement in similar device.

Kľúčové slová

Vyššie harmonické, energetika, filtre, porovnanie, čistá súčasná hodnota, rušenie, ČVUT, fakulta elektrotechnická

Key words

Harmonics, energetics, filters, comparison, net present value, interference, CTU, faculty of electrical engineering

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Kvalita elektrickej energie a rušenie.....	11
2.1 Právne predpisy a normy	11
2.1.1 Pre mn.....	11
2.1.2 Pre vn.....	12
2.1.3 Pre vvn.....	12
3. Vyššie harmonické.....	14
4. Možnosti potlačenia vyšších harmonických.....	16
4.1 Potlačenie vyšších harmonických pasívnymi rezonančnými filterami	16
4.2 Princíp filtrácie	16
4.3 Typy filtrov a zásady pre návrh.....	18
4.3.1 Jednoduchý sériový filter druhého rádu	18
4.3.2 Zatlmený filter druhého rádu	21
4.3.3 C-type filter.....	23
5. Ekonomické hodnotiace kritériá	26
5.1 Čistá súčasná hodnota NPV	26
6. Návrh filtračno-kompenzačnej stanice pre oblúkovú pec	27
6.1 Definovanie problému	27
6.2 Schémy zapojení.....	27
6.3 Zadané prúdy vyšších harmonických	28
6.4 Vypočítané hodnoty.....	29
7. Technické porovnanie zapojení oboch variánt filtrov.....	33
8. Ekonomické porovnanie zapojení oboch variánt filtrov	34
8.1 Výdaje.....	34
8.1.1 Ceny komponentov a montáž	34
8.1.2 Straty, údržba a obsluha	36
8.2 Príjmy.....	36
8.3 Tok hotovosti CF.....	37
8.4 Čistá súčasná hodnota NPV	38
8.5 Porovnanie	38
Záver	39
Literatúra	40

Zoznam Tabuliek

Tab. 1 - Dovoľené limity vyšších harmonických napätí pre nn siete.....	12
Tab. 2 - Dovoľené limity vyšších harmonických pre vn a vvn siete.....	13
Tab. 3 – Prúdy vyšších harmonických tyristorovej oblúkovej pece.	28
Tab. 4 – Prúdy vyšších harmonických tyristorovej jednotky (meniča impedancie).....	28
Tab. 5a – Jednotlivé parametre R, L, C filtrov pre variantu 1.....	29
Tab. 5b – Jednotlivé parametre R, L, C filtrov pre variantu 2.	29
Tab. 6a – Hodnoty činných strát a kompenzačného výkonu varianty 1 pre jednotlivé filtre...	32
Tab. 6b – Hodnoty činných strát a kompenzačného výkonu varianty 2 pre jednotlivé filtre. .	32
Tab. 7a – Ceny jednotlivých komponentov a montáže filtrov pre variantu 1.	35
Tab. 7b – Ceny jednotlivých komponentov a montáže filtrov pre variantu 2.....	35
Tab. 8a – Ceny strát, údržby a obsluhy filtrov pre variantu 1 na 1 rok.	36
Tab. 8b – Ceny strát, údržby a obsluhy filtrov pre variantu 2 na 1 rok.	36
Tab. 9 – Kompenzačný výkon a jeho hodnota oboch variánt na 1 rok.....	36
Tab. 10a – Výpočty hotovostných tokov za každé obdobie životnosti pre variantu 1.	37
Tab. 10b – Výpočty hotovostných tokov za každé obdobie životnosti pre variantu 2.	38
Tab. 11– Čísá súčasná hodnota NPV oboch variánt.	38

Zoznam obrázkov

Obr. 1 - Amplitudová a fázová charakteristika [3 zdroj, str. 1, obr.1].....	16
Obr. 2 - Náhradná schéma zapojenia filtra [3 zdroj, str. 2, obr. 2].....	17
Obr. 3 - Frekvenčná závislosť filtračného pomeru a amplitudová frekvenčná charakteristika sústavy [3. zdroj, str. 2, obr. 3].	18
Obr. 4 – Sériový filter.	18
Obr. 5 - Charakteristika pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky, 3.harmonickej, kompenzačný výkon 7 MVAR, menovité napätie 22 kV sériového filtra druhého rádu.....	20
Obr. 6 – Zatlmený filter.....	21
Obr. 7 -Charakteristika pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky, 3. harmonickej, kompenzačný výkon 7 MVAR, menovité napätie 22 kV zatlmeného filtra druhého rádu.	22
Obr. 8 – C-type filter.....	23
Obr. 9 - Charakteristika pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky, 3.harmonickej, kompenzačný výkon 7 MVAR, menovité napätie 22 kV C-type filtra.....	25
Obr. 10a Schéma filtračno- kompenzačnej stanice pre variantu 1.	27
Obr. 10b Schéma filtračno- kompenzačnej stanice pre variantu 2.	27
Obr. 11 Náhradná schéma nadradenej elektrizačnej sústavy.	28
Obr. 12 – Daná sústava s transformátorom 110/22 kV.....	28
Obr. 13a – Frekvenčná amplitudová charakteristika prvej varianty sústavy s filtrami.	30
Obr. 13b – Frekvenčná amplitudová charakteristika druhej varianty sústavy s filtrami.	30
Obr. 14a – Porovnanie harmonických napätí pre variantu 1.....	31
Obr. 14b – Porovnanie harmonických napätí pre variantu 2.....	31
Obr. 15a – Činné straty filtrov pre variantu 1.	32
Obr. 15b– Činné straty filtrov pre variantu 2.	32
Obr. 16 Radenie jednotlivých kondenzátorov v kondenzátorovej batérii.....	35

1. Úvod

V bakalárskej práci sa budeme zaoberať obmedzením vyšších harmonických napätí pasívnymi rezonančnými filtrami. Definujeme, čím sa zaoberá daná problematika z právneho hľadiska, ktorú popisujú jednotlivé normy ČSN EN. Z technického hľadiska popíšeme základné typy filtrov a vzťahy pre ich návrh. Definujeme ekonomické hodnotiace kritérium a jeho použitie v rozhodovaní výnosnosti investícií. V poslednej časti projektu navrhne filtračno-kompenzačnú stanicu pre elektrickú oblúkovú pec v dvoch rôznych variantách zapojenia filtrov a následne varianty technicky a ekonomicky porovnáme.

V prvom rade popíšeme, prečo sa zaoberáme touto témou a ukážeme, ktoré právne predpisy s ňou vecne súvisia. Povieme si niečo o vyšších harmonických, hlavne čo si pod nimi predstavujeme a ako vznikajú. Popíšeme, aké sú v súčasnej dobe možnosti ich potlačenia. V tejto práci sa máme venovať hlavne potlačeniu pasívnymi rezonančnými filtrami, preto si vysvetlíme tento princíp filtrácie a popíšeme najčastejšie používané filtre, ku ktorým vypracujeme jednoduchý návrh a charakteristiky. Ďalej si popíšeme hodnotiace kritérium NPV-čistá súčasná hodnota, ktoré následne použijeme na porovnanie 2 variant zapojení filtrov pre odfiltrovanie harmonických oblúkovej pece. Nakoniec tieto varianty porovnáme z technického a ekonomického hľadiska, kde technické porovnanie bude tvoriť samotné porovnanie parametrov filtra, potlačenia vyšších harmonických napätí a strát. Ekonomické porovnanie zostavíme pomocou kritéria NPV.

2. Kvalita elektrickej energie a rušenie

Energia, ktorá slúži nielen pre vlastnú potrebu výrobcu, ale aj pre potrebu ďalším odberateľom sa stala tovarom a preto bolo nutné stanoviť mierku pre posúdenie jej kvality. V minulosti boli kvalitatívne parametre stabilné napätie a frekvencia, no s rozvojom techniky a snahou o zavedenie výroby energie z obnoviteľných zdrojov, ako sú veterné a solárne elektrárne, sa zvýšila snaha o používanie úsporných zariadení a prístrojov, z ktorých väčšina má nelineárnu alebo premenlivú prevádzkovú charakteristiku. Jedná sa o polovodičové meniče, ktoré disponujú vyššou efektivitou oproti konvenčnému riešeniu prostredníctvom odporovej regulácie. Z toho dôvodu sa stále viac uplatňujú spätné vplyvy na distribučnú sústavu, ktoré môžu viesť až k rušivému ovplyvňovaniu iných prístrojov a zariadení. Preto je nutné tieto rušivé vplyvy eliminovať, alebo aspoň čiastočne obmedziť.

2.1 Právne predpisy a normy

Normy (ČSN EN 50160) obsahujú limity harmonických napätí pre rôzne úrovne veľkosti napájacieho napätia. Jednotlivé limity sú znázornené v tabuľkách (Tab.1, Tab. 2). Hodnoty napätí pre porovnanie s tabuľkou sa určujú meraním v ľubovoľnom týždennom období v desaťminútovom intervale. Pre splnenie podmienok normy musí spĺňať limit aspoň 95% stredných efektívnych hodnôt napätia.

2.1.1 Pre nn

- **Nesymetria napájacieho napätia (4.2.4)** – Za normálnych prevádzkových podmienok musí byť v ľubovoľnom týždennom období 95% desaťminútových stredných efektívnych hodnôt spätnej zložky (základnej) napájacieho napätia v rozsahu 0 až 2% súslednej zložky. V niektorých oblastiach, v ktorých sú inštalácie odberateľov čiastočne pripojené jednofázovo alebo dvojfázovo sa vyskytujú nesymetrie až do 3%.

- **Harmonické napätie (4.2.5)** - Za normálnych prevádzkových podmienok musí byť v ľubovoľnom týždennom období 95% desaťminútových stredných efektívnych hodnôt napätia každá harmonická menšia alebo rovná hodnote uvedenej v tabuľke (Tab. 1). Ďalej celkový činiteľ harmonického skreslenia THD napájacieho napätia (zahrňuje všetky harmonické až do radu 40) musí byť menší alebo rovný 8 %. Obmedzenie do radu 40 je dohodnuté.

Nepárne harmonické				Párne harmonické	
Nie násobky 3		Násobky 3			
Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

POZNÁMKA Úrovně pre harmonické vyšších rádov ako 25 sa neuvádzajú, keďže sú obvykle malé, avšak vplyvom rezonančných javov ťažko predvídateľné.

Tab. 1 - Dovoľené limity vyšších harmonických napätí pre nn siete.

2.1.2 Pre vn

- **Nesymetria napájacieho napätia (5.2.4)** – Platí rovnako ako pre nn, avšak nesymetria v niektorých oblastiach môže byť 3 % v trojfázových predávacích miestach.

- **Harmonické napätia (5.2.5)** - Za normálnych prevádzkových podmienok musia byť v ľubovoľnom týždennom období 95% desaťminútových stredných efektívnych hodnôt každého jednotlivého harmonického napätia menšie alebo rovné hodnote uvedenej v tabuľke (Tab. 2). Ďalej celkový činiteľ harmonického skreslenia THD napájacieho napätia (zahrňuje všetky harmonické až do rádu 40) musí byť menší alebo rovný 8 %. Obmedzenie do rádu 40 je dohodnuté. V závislosti na druhu siete môžu byť hodnoty tretej harmonickej podstatne nižšie (platí pre násobok 3 rádu harmonickej, $h=3$)

2.1.3 Pre vvn

- **Nesymetria napájacieho napätia (6.2.4)** – Platí rovnako ako pre vn. Hodnoty nesymetrie napájacieho napätia sú len informatívne, limity sa určujú na základe meraní.

- **Harmonické napätia (6.2.5)** – Za normálnych prevádzkových podmienok musia byť v ľubovoľnom týždennom období 95% desaťminútových stredných efektívnych hodnôt každého jednotlivého harmonického napätia menšie alebo rovné hodnote uvedenej v tabuľke (Tab. 2). Obmedzenia pre každé harmonické napätia sa skúmajú. Obmedzenie pre harmonické napájacieho napätia (vrátane všetkých harmonických do rádu 40) je predmetom dohody.

Nepárne harmonické				Párne harmonické	
Nie násobky 3		Násobky 3			
Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h
5	6,0 %	3	3,0 % ^{a)}	2	1,9 %
7	5,0 %	9	1,3 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...25	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	skúma sa				
19	skúma sa				
23	skúma sa				
25	skúma sa				

^{a)} V závislosti na druhu siete môžu byť hodnoty tretej harmonickej podstatne nižšie.

Tab. 2 - Dovoľené limity vyšších harmonických pre vn a vvn siete.

Podkapitoly 2.1, 2.1.1, 2.1.2 a 2.1.3 sú upravené podľa zdroja [4. zdroj].

3. Vyššie harmonické

Jedná sa o rušenie v sieti spôsobené celistvými násobkami základnej sieťovej frekvencie. Zdrojom sú zariadenia z nelineárnou volt-ampérovou charakteristikou ako sú oblúkové pece, plynové výbojky, indukčnosti, transformátory, meniče a pod. Keďže zariadenia neodoberajú len zložku prúdu 1. harmonickej (50 HZ), ale celý súbor vyšších harmonických prúdov, má toto rušenie veľký vplyv na tieto zariadenia. Tento vplyv môže spôsobiť nesprávnu funkciu daného zariadenia, ale môže spôsobiť aj vážnejšie následky. Ako príklady následkov vyšších harmonických sa dá uviesť skrátenie životnosti niektorých komponentov v sieti, chybná funkcia ochrán a preťažovanie stredného vodiča. Prúdy vyšších harmonických nepriaznivo ovplyvňujú zhasnutie oblúkov zemných spojení. Dajú sa potlačiť bez prídavného zapojenia a to rôznymi druhmi zapojenia meničov alebo filtrami vyšších harmonických (aktívne a pasívne filtre).

Harmonické priebehy sa dajú vyjadriť pomocou nekonečnej rady zloženej z konštanty a harmonických veličín o frekvencii rovnej prirodzeným násobkom základnej frekvencie. Popisuje ich Fourierova transformácia. Vzťahy (1-4) popisujú analytické vyjadrenie Fourierovej rady periodickej funkcie $f(t)$ s uhlovou frekvenciou.

$$F(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (1)$$

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{pre } n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad \text{pre } n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

Spektrálny tvar Fourierovej rady vyjadrujú vzťahy (5-7), kde C_n je amplitudové spektrum a φ_n je fázové spektrum.

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (5)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (6)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n} \quad (7)$$

Diskrétny tvar Fourierovej transformácie vyjadruje vzťah (8), kde T je doba medzi dvoma vzorkami, N je počet vzorkov za periódu a X_k je hodnota nameraná v čase kT .

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \cdot e^{-jn \frac{2\pi}{N} k} \quad (8)$$

Periodický priebeh vo Fourierovej transformácii vyjadruje vzťah (9,10).

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (9)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (10)$$

Pre zhodnotenie miery rušenia sú podstatné údaje: obsah základnej harmonickej „g“, ktorý vypočítame podľa vzťahu (11), obsah vyšších harmonických „k“ daný vzťahom (12) a celkové harmonické skreslenie „THD“ (13).

$$g = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}} \quad (11)$$

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (12)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (13)$$

Kapitola 3 je upravená podľa zdroja [3. zdroj].

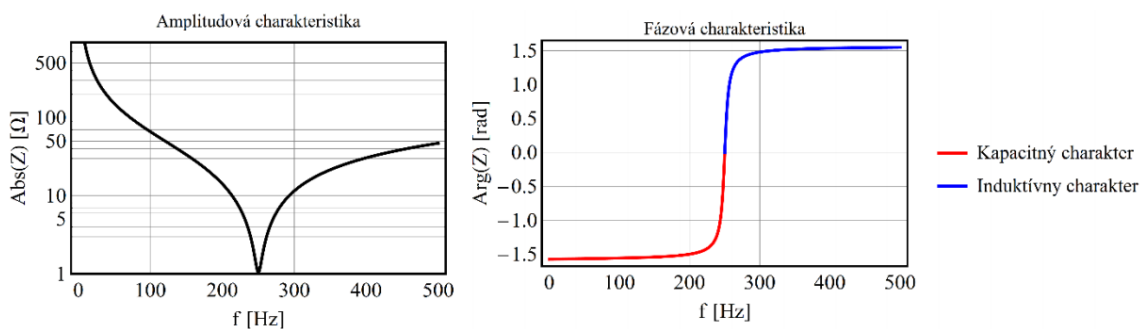
4. Možnosti potlačenia vyšších harmonických

V zmysle normy ČSN EN 50160 musia byť splnené dovolené limity vyšších harmonických napätí. Tento problém je možné riešiť radou možností. V prípade symetrického fázového odberu sa dajú použiť transformátory zapojené do trojuholníka alebo lomenej hviezdy. Pri použití viac-pulzných usmerňovačov sa odber zo siete podobá sínusovému priebehu základnej harmonickej, znížia sa veľkosti napätia vyšších harmonických, avšak objavajú sa aj vyššie frekvencie. V projekte sa zameriame na spôsob potlačenia pomocou pasívnych filtrov.

4.1 Potlačenie vyšších harmonických pasívnymi rezonančnými filtermi

Výhody a základné charakteristiky

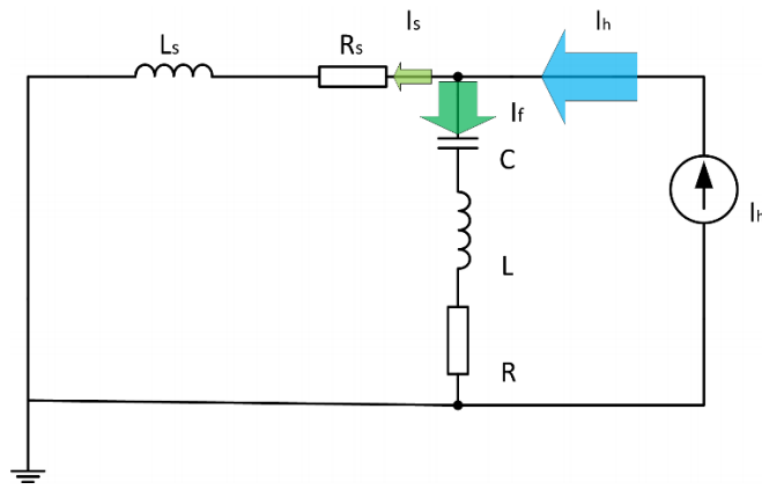
Hlavnou výhodou pasívnych filtrov je široké spektrum výkonov (desiatky MVar). Taktiež pôsobia ako kompenzačná kapacita pre základnú harmonickej. Z charakteristík (Obr. 1) je zrejmé, že obvod pre frekvencie nižšie ako rezonančná (250Hz) vykazuje kapacitný charakter, čo je výhodné pre kompenzáciu jalového výkonu.



Obr. 1 - Amplitudová a fázová charakteristika [3. zdroj, str. 1, obr.1].

4.2 Princíp filtrácie

Hlavnou úlohou filtra je, aby sa do sústavy dostal čo najmenší prúd vyššej harmonickej. Analýzou náhradnej schémy zapojenia filtra (Obr. 2) vieme určiť vzťah pre niektoré podstatné veličiny. Prúd označený ako I_h je prúd vyššej harmonickej „generovaný“ záťažou. Prúd I_s je prúd tečúci do sústavy a ten je popísaný vzťahom pre prúdový delič (14). Obdobne ako I_s je vzťahom pre prúdový delič popísaný aj prúd I_f (15), jedná sa o prúd vyššej harmonickej tečúci cez filter.



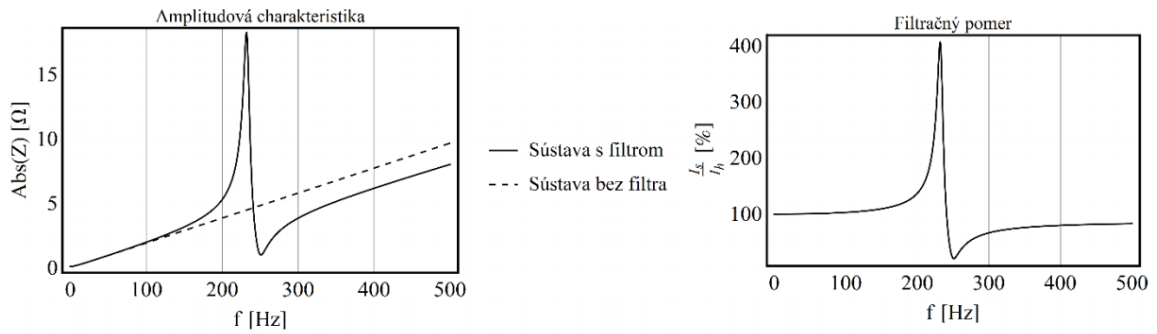
Obr. 2 - Náhradná schéma zapojenia filtra [3. zdroj, str. 2, obr. 2].

$$\hat{I}_s = \hat{I}_h \frac{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}{R_s + j\omega L_s + R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \hat{I}_h \frac{\hat{Z}_f}{\hat{Z}_s + \hat{Z}_f} \quad (14)$$

$$\hat{I}_f = \hat{I}_h \frac{R_s + j\omega L_s}{R_s + j\omega L_s + R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \hat{I}_h \frac{\hat{Z}_s}{\hat{Z}_s + \hat{Z}_f} \quad (15)$$

Pomer prúdov tečúcich do sústavy a zo záťaže (I_s/I_h) nám udáva, koľko percent generovaného prúdu vyššej harmonickej sa dostáva do nadradenej sústavy (16). Na prvý pohľad sa zdá, že tento pomer by sme mali skúmať len pre vyššiu harmonickú frekvenciu, na ktorú je filter naladený. V skutočnosti sa cez filter uzatvárajú aj iné frekvencie. Frekvenčná závislosť filtračného pomeru a amplitudová frekvenčná charakteristika sústavy je znázornená na obrázku (Obr. 3).

$$\frac{I_s}{I_h} = \frac{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}{R_s + j\omega L_s + R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\hat{Z}_f}{\hat{Z}_s + \hat{Z}_f} \quad (16)$$



Obr. 3 - Frekvenčná závislosť filtračného pomeru a amplitudová frekvenčná charakteristika sústavy [3. zdroj, str. 2, obr. 3].

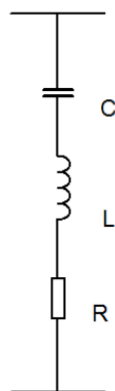
Podkapitoly 4, 4.1 a 4.2 sú upravené podľa zdroja [3. zdroj].

4.3 Typy filtrov a zásady pre návrh

U väčšiny filtračne kompenzačných staníc sa najčastejšie stretáme s tromi základnými druhmi pasívnych rezonančných filtrov vyšších harmonických, kde každé zapojenie vykazuje určité vlastnosti (frekvenčná amplitudová charakteristika, napäťové a prúdové namáhanie, činné straty v obvodoch).

4.3.1 Jednoduchý sériový filter druhého rádu

Jedná sa o najpoužívanejší typ filtra. Má jednoduchú konštrukciu, na ktorú je potrebná len tlmivka so sériovo radenou kondenzátorovou batériou. Odporový člen R tvorí činný odpor vinutia tlmivky. (Obr. 4)



Obr. 4 – Sériový filter.

Návrh: Začneme zavedením koeficientu zvýšenia napätia na kondenzátore „a“ (1.1), kde U_{C1} predstavuje napätie na kondenzátorovej batérii, U_{N1} predstavuje menovité napätie filtra pre základnú harmonickú a n_r predstavuje rád vyššej harmonickej, na ktorú je filter naladený. Ďalej si zavedieme vzťah pre kompenzačný výkon podľa (1.2). Vzťah (1.3), teda vzťah pre minimálnu hodnotu kompenzačného výkonu sa zavádza z dôvodu, aby filter nebol preťažovaný prúdom danej vyššej harmonickej. Vychádza sa z najväčšieho možného prúdu danej vyššej harmonickej (I_{hmax}). Charakteristiku sériového filtra pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky zaznamenáva (Obr. 5).

$$a = \frac{U_{C1}}{U_{N1}} = \frac{X_c}{X_c - X_L} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \quad (1.1)$$

$$Q_{CF} = 3aU_{N1}^2 \omega_1 C \quad (1.2)$$

$$Q_{CFmin} = 3 \sqrt{\frac{a}{n_r}} I_{hmax} U_{N1} \quad (1.3)$$

Skutočný kompenzačný výkon pre základnú harmonickú určíme podľa (1.4). Jedná sa o vplyv zníženia napätia kondenzátoru. Výsledné parametre prvkov, teda kapacitu (1.5), indukčnosť (1.6), odpor (1.7) a celkovú impedanciu filtra (1.8) vypočítame podľa nasledujúcich vzťahov.

$$Q_{komp} = \frac{Q_{CF}}{a} \quad (1.4)$$

$$C_h = \frac{Q_{CF}}{aU_1^2 \omega_1} \quad (1.5)$$

$$L_h = \frac{aU_1^2}{n_r^2 \omega_1 Q_{CF}} \quad (1.6)$$

$$R_h = \frac{n_r \omega_1 L_h}{Q} \quad (1.7)$$

$$Z_h(\omega) = R_h + j\omega L_h + \frac{1}{j\omega C_h} \quad (1.8)$$

Postup pre návrh jednoduchého sériového filtra 3. harmonickej, s činiteľom akosti $Q=25$, výkonom $Q_{komp} = 7$ MVar a pre napäťovú hladinu 22 kV je nasledovný. Podľa rovnice (N1.1) si spočítame koeficient zvýšenia napätia na kondenzátore „a“. Následovne, zo vzťahu (N1.2), dostaneme kompenzačný výkon Q_{CF} . Nakoniec vypočítame jednotlivé hodnoty

parametrov, t.j. kapacity batérie (N1.3) indukčnosti tlmivky (N1.4) a odporu (N1.5), ktoré dosadíme do vzťahu pre celkovú impedanciu filtra (N1.6). Absolútnu hodnotu impedancie použijeme na vytvorenie charakteristiky na (obr. 5).

$$a = \frac{U_{C1}}{U_{N1}} = \frac{X_c}{X_c - X_L} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} = \frac{3^2}{3^2 - 1} = \frac{9}{9 - 1} = \frac{9}{8} \quad (N1.1)$$

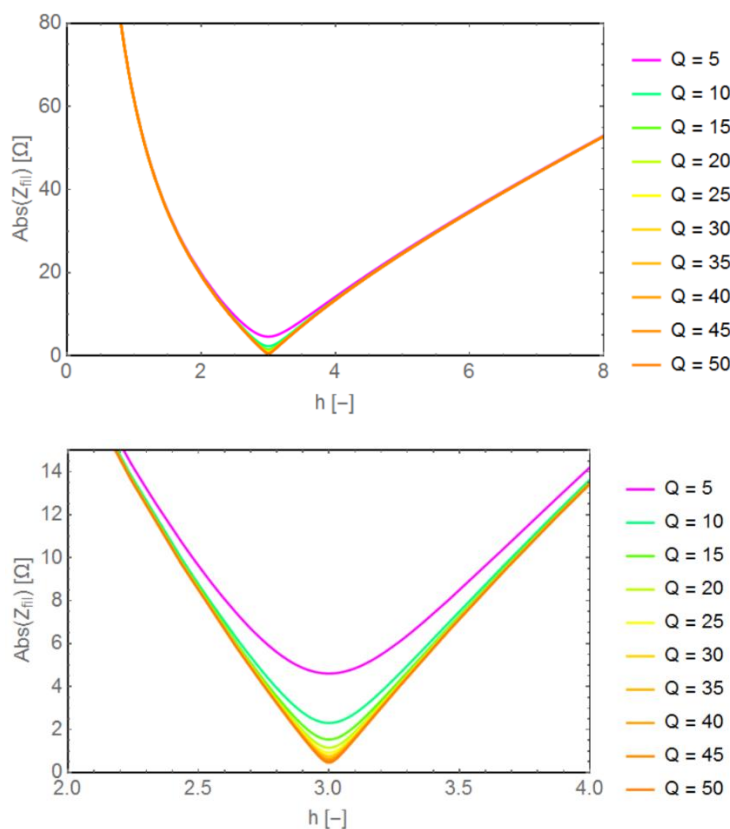
$$Q_{CF} = a * Q_{komp} = \frac{9}{8} * 7 * 10^6 \quad (N1.2)$$

$$C_h = \frac{Q_{CF}}{aU_1^2\omega_1} = \frac{\frac{9}{8} * 7 * 10^6}{\frac{9}{8} * 22000^2 * 314} = 46,06\mu F \quad (N1.3)$$

$$L_h = \frac{aU_1^2}{n_r^2\omega_1Q_{CF}} = \frac{\frac{9}{8} * 22000^2}{3^2 * 314 * \frac{9}{8} * 7 * 10^6} = 24,46mH \quad (N1.4)$$

$$R_h = \frac{n_r\omega_1L_h}{Q} = \frac{3 * 314 * 0,02446}{25} = 0,921\Omega \quad (N1.5)$$

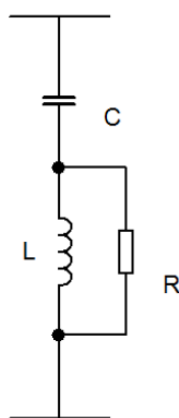
$$Z_h(\omega) = R_h + j\omega L_h + \frac{1}{j\omega C_h} = 0,921 - 62,5251j (\omega = 314) \quad (N1.6)$$



Obr. 5 - Charakteristika pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky, 3.harmonickej, kompenzačný výkon 7 MVar, menovité napätie 22 kV sériového filtra druhého rádu.

4.3.2 Zatlmený filter druhého rádu

Na rozdiel od sériového filtra je odpor zapojený paralelne s tlmivkou (tlmiaci odpor) (Obr. 6). Podstata zapojenia je v zmene amplitúdovej a frekvenčnej charakteristiky. Tento filter, v porovnaní so sériovým filtrom druhého rádu, nebude odsávať prúdy, na ktoré je naladený až tak efektívne, ale zásadne obmedzí vyššie harmonické iných frekvencií. Pri pripojení filtra do sústavy s vysokým skratovým výkonom nemusí byť filtrácia rezonančnej frekvencie tak problematická. Z tohto dôvodu nie je potrebná tak nízka impedancia filtra. Najväčšou výhodou je práve schopnosť potlačiť ostatné harmonické, čo môže priniesť úsporu na ďalších filtroch tým, že nebudú potrebné. Charakteristiku zatlmeného filtra pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky zaznamenáva (Obr. 7).



Obr. 6 – Zatlmený filter.

Návrh: Prvky L a C sa určujú obdobne ako v prípade sériového filtra druhého rádu. Pre určenie tlmiaceho odporu je potrebné podľa vzťahu (2.1) určiť charakteristickú impedanciu filtra. Vynásobením charakteristickej impedancie filtra činiteľom akosti Q dostávame samotnú veľkosť tlmiaceho odporu (2.2). Pre celkovú impedanciu filtra potom platí vzťah (2.3).

$$X_{char} = \sqrt{\frac{L_h}{C_h}} \quad (2.1)$$

$$R_h = X_{char} Q \quad (2.2)$$

$$Z_h(\omega) = \frac{j\omega L_h R_h}{R_h + j\omega L_h} + \frac{1}{j\omega C_h} \quad (2.3)$$

Postup pre návrh zatlmeného filtra 3. harmonickej, s činiteľom akosti $Q=25$, výkonom $Q_{komp} = 7$ MVar a pre napätovú hladinu 22 kV je nasledovný. Podľa rovnice (N2.1) si spočítame koeficient zvýšenia napätia na kondenzátore „a“. Následovne zo vzťahu (N2.2) dostaneme kompenzačný výkon Q_{CF} . Vypočítame jednotlivé hodnoty parametrov, t.j. kapacity

batérie (N2.3), indukčnosti tlmivky (N2.4) a odporu (N2.6), ktorý spočítame pomocou charakteristickej reaktancie (N2.5). Dosadíme do vzťahu pre celkovú impedanciu filtra (N2.7). Absolútnu hodnotu impedancie použijeme na vytvorenie charakteristiky na (obr. 7).

$$a = \frac{U_{C1}}{U_{N1}} = \frac{X_c}{X_c - X_L} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} = \frac{3^2}{3^2 - 1} = \frac{9}{9 - 1} = \frac{9}{8} \quad (N2.1)$$

$$Q_{CF} = a * Q_{komp} = \frac{9}{8} * 7 * 10^6 \quad (N2.2)$$

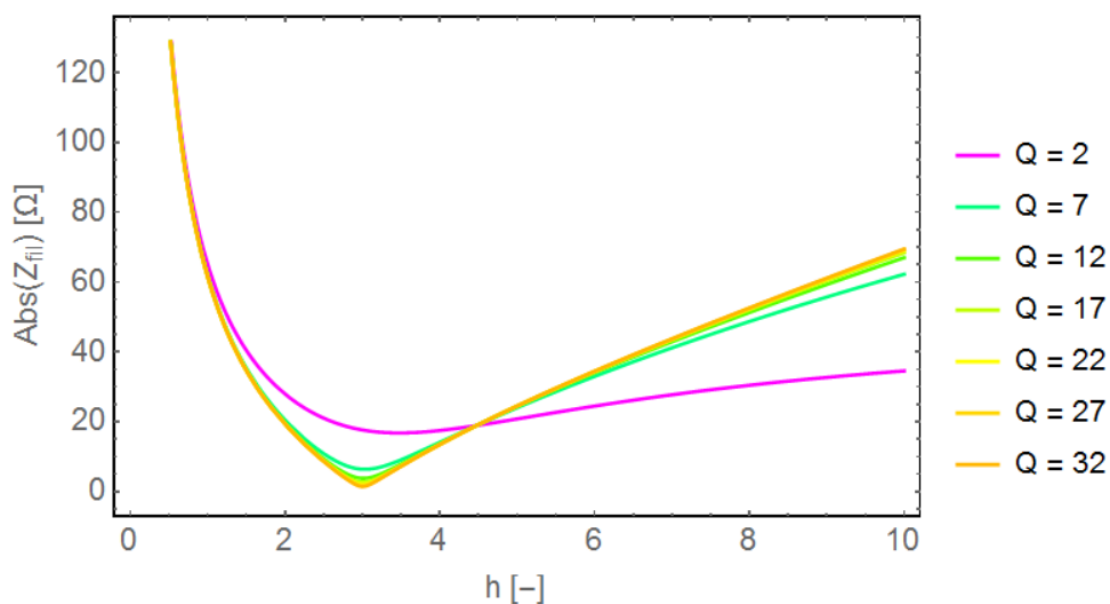
$$C_h = \frac{Q_{CF}}{aU_1^2\omega_1} = \frac{\frac{9}{8} * 7 * 10^6}{\frac{9}{8} * 22000^2 * 314} = 46,06\mu F \quad (N2.3)$$

$$L_h = \frac{aU_1^2}{n_r^2\omega_1Q_{CF}} = \frac{\frac{9}{8} * 22000^2}{3^2 * 314 * \frac{9}{8} * 7 * 10^6} = 24,46mH \quad (N2.4)$$

$$X_{char} = \sqrt[2]{\frac{L_h}{C_h}} = \sqrt[2]{\frac{0,02446}{0,04606 * 10^{-3}}} = \sqrt[2]{531,0464} = 23,044 \quad (N2.5)$$

$$R_h = X_{char}Q = 23,044 * 25 = 576,111\Omega \quad (N2.6)$$

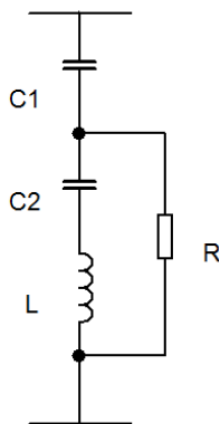
$$Z_h(\omega) = \frac{j\omega L_h R_h}{R_h + j\omega L_h} + \frac{1}{j\omega C_h} = 0.101 - 61.526j \quad (\omega = 314) \quad (N2.7)$$



Obr. 7 -Charakteristika pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky, 3. harmonickej, kompenzačný výkon 7 MVar, menovité napätie 22 kV zatlmeného filtra druhého rádu.

4.3.3 C-type filter

Jedná sa o kombináciu prvkov dvoch kondenzátorov a tlmivky, ku ktorej je paralelne zapojený odpor (Obr. 8). Tento filter je výhodný z hľadiska činných strát a tvaru frekvenčnej amplitúdovej charakteristiky. Charakteristiku sériového filtra pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky zaznamenáva (Obr. 9).



Obr. 8 – C-type filter.

Návrh: Obdobne ako v predošlých prípadoch vychádzame z kompenzačného výkonu (3.1). Kapacitu C_1 určíme vzťahom (3.2). Kapacitu C_2 následne spočítame zo vzťahu (3.3). Z podmienky rezonancie medzi L a C_2 určíme indukčnosť (3.4). pre Tlmiaci odpor platí vzťah (3.5). A nakoniec celková impedancia filtra je rovná vzťahu (3.6).

$$Q_{CF} = 3aU_{N1}^2\omega_1C \quad (3.1)$$

$$C_1 = \frac{Q_{CF}}{U_1^2\omega_1} \quad (3.2)$$

$$C_2 = C_1(n_r^2 - 1) \quad (3.3)$$

$$L = \frac{1}{C_2\omega_1^2} \quad (3.4)$$

$$R = \frac{QU_1^2}{n_r Q_{CF}} \quad (3.5)$$

$$Z_h(\omega) = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2}\right)R_h}{R_h + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2}} \quad (3.6)$$

Postup pre návrh C-type filtra 3. harmonickej s činiteľom akosti $Q=25$, výkonom $Q_{komp} = 7$ MVar a pre napäťovú hladinu 22 kV je následovný. Podľa rovnice (N3.1) si spočítame koeficient zvýšenia napätia na kondenzátore „a“. Následovne zo vzťahu (N3.2) dostaneme kompenzačný výkon Q_{CF} . Vypočítame jednotlivé hodnoty parametrov, t.j. kapacity C_1 (N3.3),

kapacity C_2 (N3.4), indukčnosti tlmivky (N3.5) a odporu (N3.6). Dosadíme do vzťahu pre celkovú impedanciu filtra (N3.7). Absolútnu hodnotu impedancie použijeme na vytvorenie charakteristiky na (obr. 9).

$$a = \frac{U_{C1}}{U_{N1}} = \frac{X_c}{X_c - X_L} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} = \frac{3^2}{3^2 - 1} = \frac{9}{9 - 1} = \frac{9}{8} \quad (N3.1)$$

$$Q_{CF} = a * Q_{komp} = \frac{9}{8} * 7 * 10^6 \quad (N3.2)$$

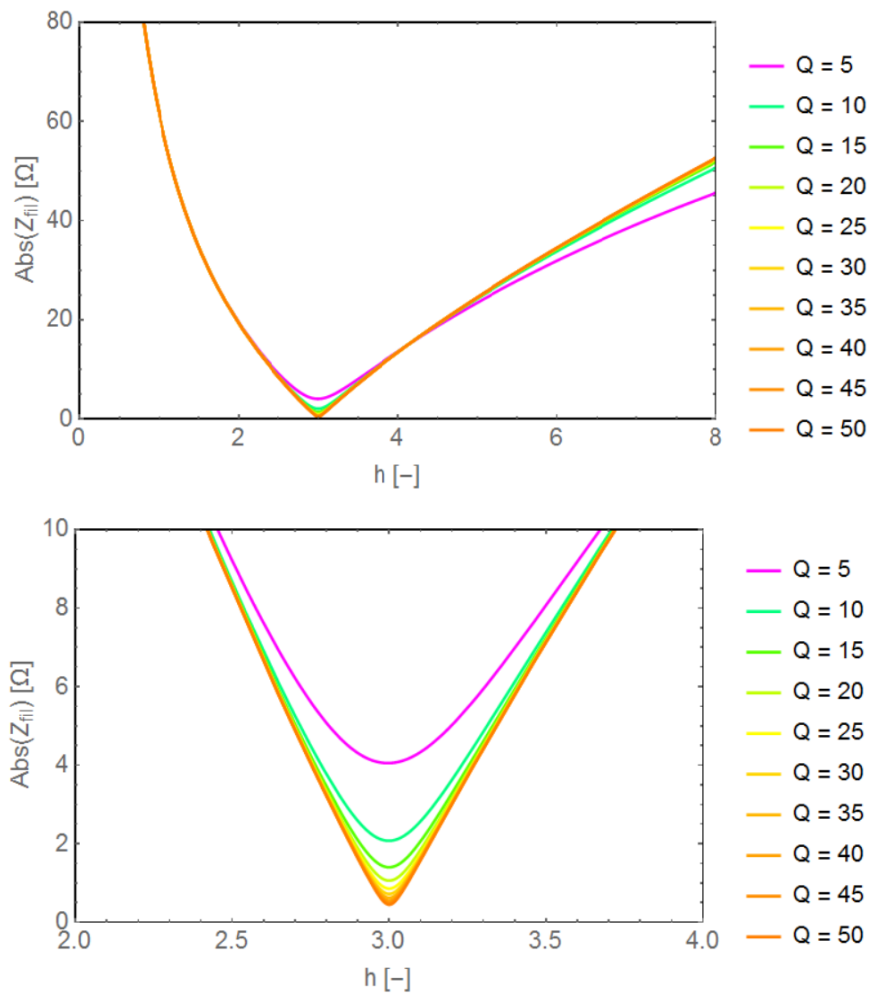
$$C_1 = \frac{Q_{CF}}{U_1^2 \omega_1} = \frac{\frac{9}{8} * 7 * 10^6}{22000^2 * 314} = 51,8174 \mu F \quad (N3.3)$$

$$C_2 = C_1(n_r^2 - 1) = C_1(3^2 - 1) = 414,539 \mu F \quad (N3.4)$$

$$L = \frac{1}{C_2 \omega_1^2} = \frac{1}{414,539 * 10^{-6} * 314^2} = 24,466 mH \quad (N3.5)$$

$$R = \frac{Q U_1^2}{n_r Q_{CF}} = \frac{25 * 22000^2}{3 * \frac{9}{8} * 7 * 10^6} = 512,169 \Omega \quad (N3.6)$$

$$Z_h(\omega) = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2}\right) R_h}{R_h + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2}} = 9.299 \times 10^{-11} - 61.469j \quad (\omega = 314) \quad (N3.7)$$



Obr. 9 - Charakteristika pre rôzne veľkosti činiteľa akosti (Q) tlmivky, 3.harmonickej, kompenzačný výkon 7 MVar, menovité napätie 22 kV C-type filtra.

Podkapitoly 4.3, 4.3.1, 4.3.2 a 4.3.3 sú upravené podľa zdroja [5. zdroj].

5. Ekonomické hodnotiace kritériá

Z hľadiska hospodárnosti musia všetky komponenty používané v sieti spĺňať isté technické a ekonomické parametre. Cieľom dimenzovania a inštalácie komponentov z technickej stránky je čo najefektívnejšie splniť podmienky a dôvody, prečo sú dané komponenty inštalované. Z ekonomickej stránky je zase nutné zhodnotiť, za akú cenu. Za čo najnižšiu cenu by mala mať inštalácia čo najväčšiu efektivitu. Pri inštalovaní a dimenzovaní filtrov vyšších harmonických sú z technických parametrov dôležité údaje o potlačení vyšších harmonických napätí, spôsobených stratách v sieti, po prípade kompenzácií jalového výkonu a pod. Mnoho z technických parametrov často súvisí aj s ekonomickými parametrami. Činné straty a kompenzačný výkon sú dôležitými údajmi ako pre technickú, tak aj pre ekonomickú analýzu.

5.1 Čistá súčasná hodnota NPV

Pre porovnanie zapojení filtrov použijeme hodnotiace kritérium porovnávania projektov a investícií NPV, teda čistej súčasnej hodnoty. NPV vypočítame podľa vzťahu (4.1), kde CF_t predstavuje peňažný tok v období t a r predstavuje diskont, teda o koľko % vieme zhodnotiť investíciu. Na výpočet cash flow, peňažného toku, použijeme priamu metódu (4.2), kde príjmy budú tvoriť ušetrené finančné prostriedky za kompenzáciu jalového výkonu. Výdaje tvorí počiatočná investícia v nultom období, teda súčet ceny všetkých prvkov, ktoré filter obsahuje, činné straty a údržba.

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t(1+r)^{-t} \quad (4.1)$$

$$CF = Príjmy - Výdaje \quad (4.2)$$

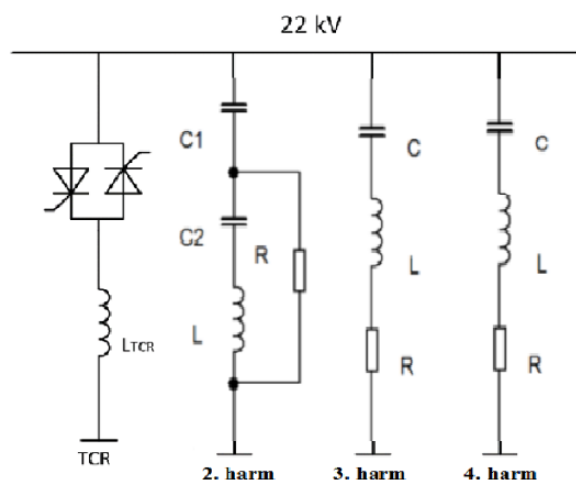
Výhodnejšia varianta alebo projekt bude ten, ktorého NPV bude vyššie.

6. Návrh filtračno-kompenzačnej stanice pre oblúkovú pec

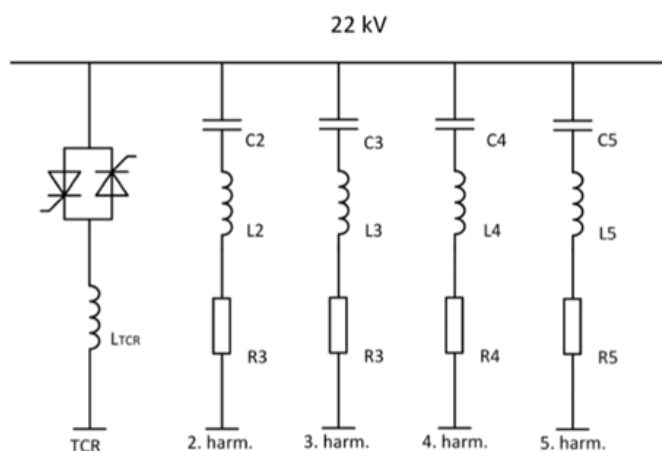
6.1 Definovanie problému

Navrhnite parametre pre dve filtračno-kompenzačné zariadenia SVC podľa schémy na obrázku (obr. 10 a, b) pre elektrickú oblúkovú pec. Filtračno-kompenzačné zariadenie bude pripojené v systéme VN (22 kV). Menovitý prúd pece pre hladinu 22 kV je 1,25 kA, na rovnaký menovitý prúd bude navrhnutá i jednotka TCR. Zo zadanej hodnoty menovitého prúdu určte prúdy vyšších harmonických pomocou tabuliek (Tab. 3, 4). Pec je napájaná zo sústavy 110 kV s rázovým skratovým výkonom 1400 MVA, schéma je zaznamenaná na obrázku (obr. 12). Pri chode nakrátko pec odoberá 53 MVA_r jalového výkonu, ktorý je potrebné vykompenzovať. Pre napájanie je inštalovaný transformátor 110/22 kV, 63 MVA s napätím nakrátko 12 %.

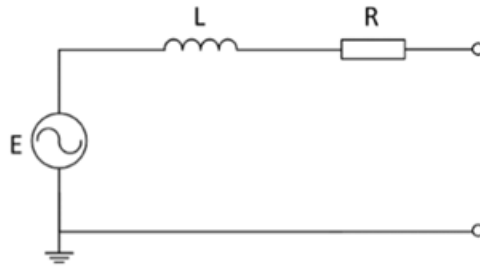
6.2 Schémy zapojení



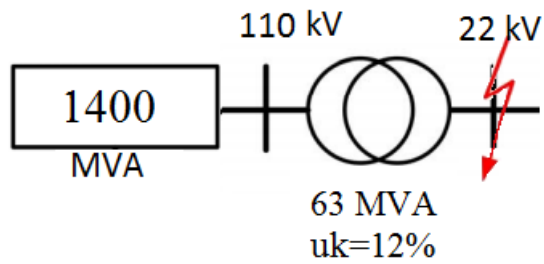
Obr. 10a Schéma filtračno-kompenzačnej stanice pre variantu 1.



Obr. 10b Schéma filtračno-kompenzačnej stanice pre variantu 2.



Obr. 11 Náhradná schéma nadradenej elektrizačnej sústavy.



Obr. 12 – Daná sústava s transformátorom 110/22 kV.

6.3 Zadané prúdy vyšších harmonických

h	I [%]	h	I [%]	h	I [%]	h	I [%]
1	100	6	0.85	11	0.63	16	0.17
2	4.17	7	1.63	12	0.27	17	0.29
3	7.35	8	0.52	13	0.46	18	0.14
4	1.60	9	0.91	14	0.22	19	0.24
5	4.23	10	0.37	15	0.19	20	0.12

Tab. 3 – Prúdy vyšších harmonických tyristorovej oblúkovej pece.

h	I [%]
1	100
3	7.34
5	4.23
7	1.60

Tab. 4 – Prúdy vyšších harmonických tyristorovej jednotky (meniča impedancie).

6.4 Vypočítané hodnoty

POZN. Na výpočet všetkých parametrov bol použitý software Wolfram Mathematica 10.0.

Vypočítané parametre prvkov pre jednotlivé filtre sú uvedené v tabuľkách (Tab. 5 a, b). Na výpočet sme použili postup z kapitoly 4.3, teda postup pre návrh jednotlivých filtrov.

Tab. 5a	Filter n-tej harmonickej		
	2.harmonická	3.harmonická	4.harmonická
R [Ω]	70.58	0.73	0.93
L [mH]	21.39	7.78	7.4
C [μ F]	157.84	144.686	85.4
C ₂ [μ F]	473.519		

Tab. 5a – Jednotlivé parametre R, L, C filtrov pre variantu 1.

Tab. 5b	Filter n-tej harmonickej			
	2.harmonická	3.harmonická	4.harmonická	5.harmonická
R [Ω]	1.61	0.8	1.1	1.38
L [mH]	25.6	8.55	8.75	8.8
C [μ F]	98.6	131.5	72.34	46.03

Tab. 5b – Jednotlivé parametre R, L, C filtrov pre variantu 2.

Na prepočet parametrov sústavy máme danú sústavu 110 kV s rázovým skratovým výkonom 1400 MVA. Pre napájanie je inštalovaný transformátor 110/22 kV, 63 MVA s napätím nakrátko 12 %. Počítame skratový výkon v mieste 22 kV, ako je znázornené na obrázku (Obr. 12). Spočítame si reaktanciu sústavy X_s podľa (5.1). Vzťahom (5.2) vypočítame reaktanciu transformátora X_T . Celková reaktancia X_c bude súčet týchto reaktancií (5.3), keďže sústava je „sériovo“ s transformátorom. Skratový výkon v mieste skratu bude potom podľa (5.4) 381 MVA.

$$X_s = \frac{U_N^2}{S_{ks}} = \frac{22^2}{2800} = 0,3457 \quad (5.1)$$

$$X_T = u_k \frac{U_n^2}{S_n} = 0,13 \frac{22^2}{63} = 0,9219 \quad (5.2)$$

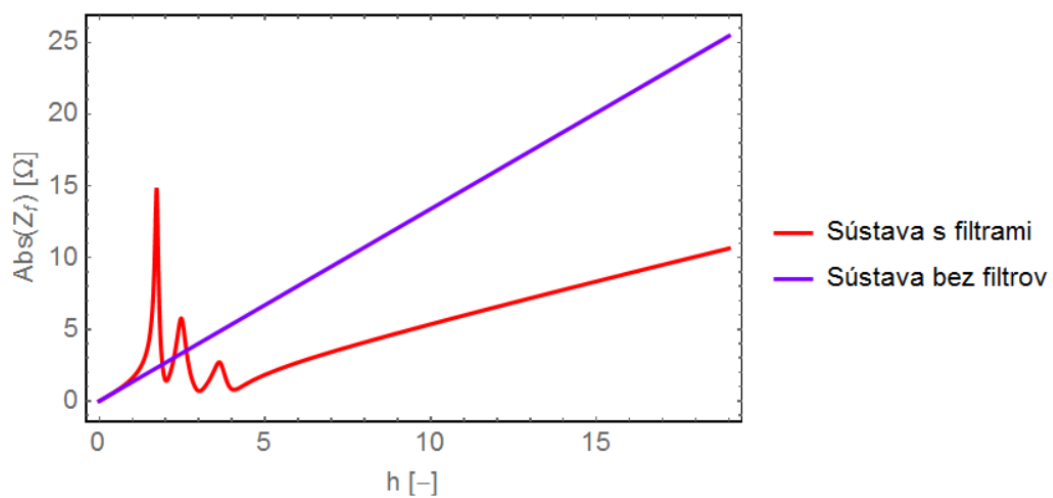
$$X_c = X_s + X_T = 0,3457 + 0,9219 = 1,2676 \quad (5.3)$$

$$S_{22} = \frac{U_N^2}{X_c} = \frac{22^2 \cdot 10^6}{1,2676} = 381 \text{ MVA} \quad (5.4)$$

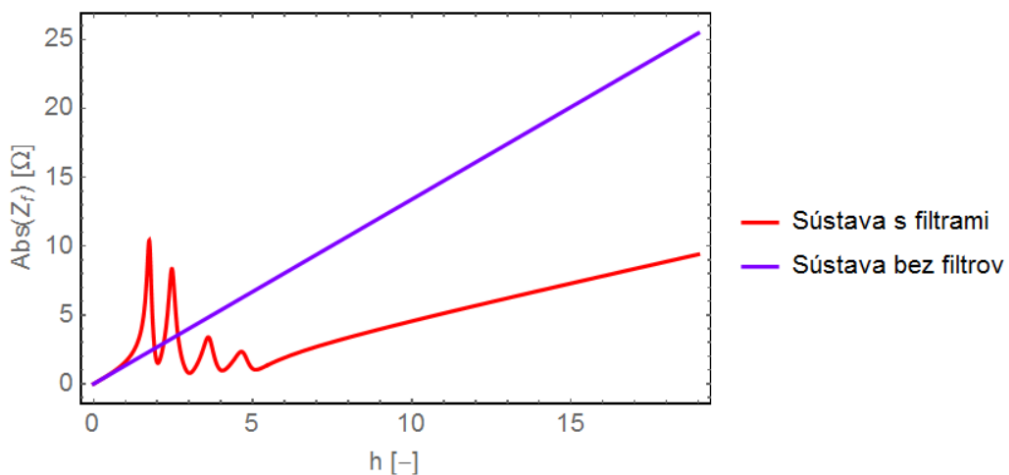
Vypočítame si impedancie sústavy, filtrov a ich paralelnú kombináciu použijeme na vytvorenie frekvenčno- amplitudovej charakteristiky sústavy s filtrami, kde impedancia filtrov je daná podľa (5.5) a impedancia sústavy je daná vzťahom (5.6). Na obrázku (Obr. 13 a, b) je frekvenčno-amplitudová charakteristika oboch variánt sústavy s filtrami.

$$Z_h(\omega) = R_h + j\omega L_h + \frac{1}{j\omega C_h} \quad (5.5)$$

$$Z_s = jX_c h \quad (5.6)$$



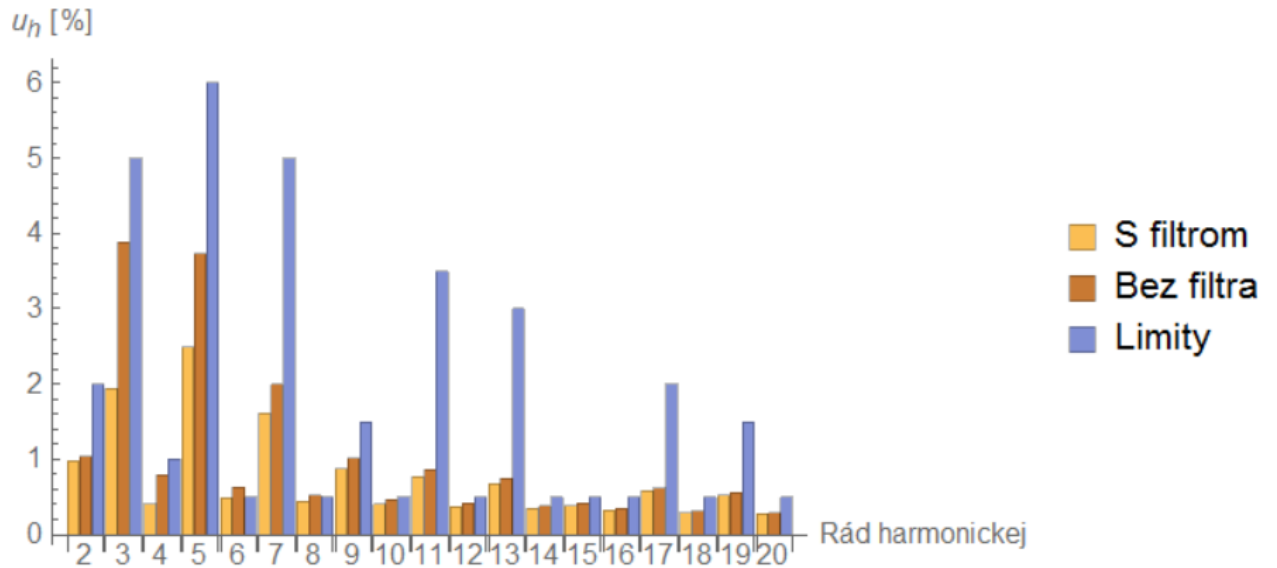
Obr. 13a – Frekvenčná amplitudová charakteristika prvej varianty sústavy s filtrami.



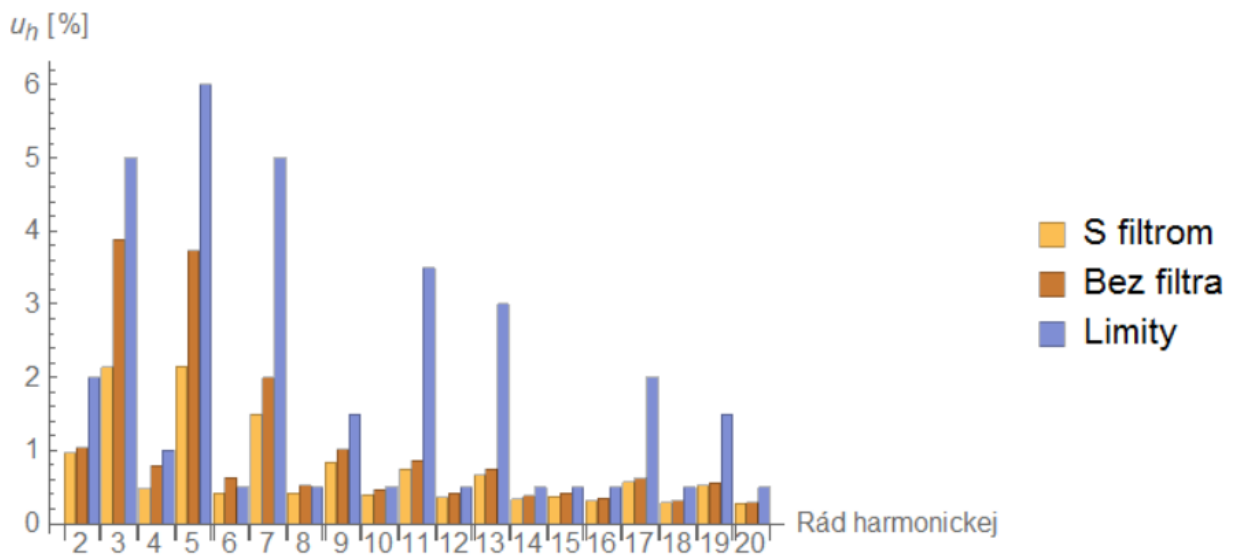
Obr. 13b – Frekvenčná amplitudová charakteristika druhej varianty sústavy s filtrami.

Ďalej sme skúmali napätie každej harmonickej od 2. do 20. - pred filtráciou a po filtrácii. Výsledné hodnoty sme porovnali s limitami z tabuľky (Tab. 2), teda hodnotami vymedzenými

normou ČSN EN 50160. Výsledok popisuje obrázok (Obr. 14 a, b), kde je výrazný pokles napätí po filtrácii vzhľadom na napätie pred filtrovaním. Ako príklad si uveďme prípad 6. harmonickej kde je vidno, že sústava pred filtrovaním nespĺňala limity napätí stanovené normou ČSN EN 50160, no po filtrovaní limity spĺňa.



Obr. 14a – Porovnanie harmonických napätí pre variantu 1.



Obr. 14b – Porovnanie harmonických napätí pre variantu 2.

Činné straty filtrov jednotlivých harmonických sme vypočítali podľa (5.7) a (5.8), sú znázornené na obrázku (Obr. 15 a, b) pre obe varianty zapojenia filtrov vyšších harmonických. V tabuľke (Tab. 6 a, b) je uvedený kompenzačný výkon filtrov, ktorý sme vypočítali pomocou

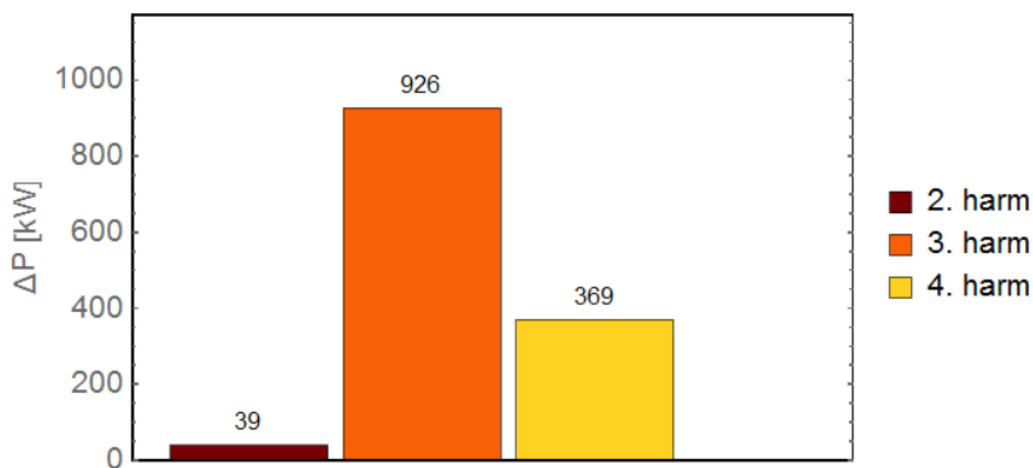
vzťahu (5.9). Po súčte kompenzačného výkonu každého filtra dostaneme celkový kompenzačný výkon $Q_{kc}=53$ MVar, čo odpovedá výkonu, ktorý bolo nutné kompenzovať.

Tab. 6a	2.harmonická	3.harmonická	4.harmonická	Celkovo
Straty [kW]	39	926	369	1334
Komp. Výkon [MVar]	18	22	13	53

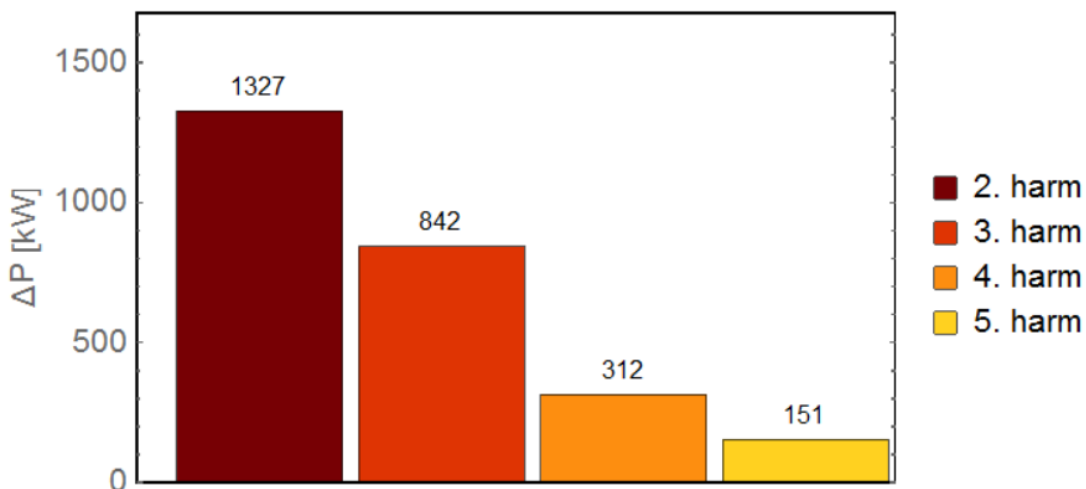
Tab. 6a – Hodnoty činných strát a kompenzačného výkonu varianty 1 pre jednotlivé filtre.

Tab. 6b	2.harmonická	3.harmonická	4.harmonická	5. harmonická	Celkovo
Straty [kW]	1327	842	312	151	2632
Komp. Výkon [MVar]	15	20	11	7	53

Tab. 6b – Hodnoty činných strát a kompenzačného výkonu varianty 2 pre jednotlivé filtre.



Obr. 15a – Činné straty filtrov pre variantu 1.



Obr. 15b – Činné straty filtrov pre variantu 2.

$$S = U_N \left(\frac{U_N}{Z_N} \right)^* \quad (5.7)$$

$$\Delta P = \operatorname{Re}[S] \quad (5.8)$$

$$Q_k = \operatorname{Im}[S] \quad (5.9)$$

7. Technické porovnanie zapojení oboch variánt filtrov

Na základe výsledkov filtrovania (obr. 14,15 a,b) sme dospeli k záveru, že obe varianty sú použiteľné pre filtrovanie vyšších harmonických tohto druhu oblúkovej pece, teda obe varianty potlačili vyššie harmonické napätia pod limity stanovené normou. Varianta 1 je kombinácia troch druhov filtrov, konkrétne C-type filter pre 2. harmonickú a dva jednoduché sériové filtre druhého rádu pre 3. a 4. harmonickú. Celkovo táto varianta obsahuje 8 súčiastok, konkrétne 4 kondenzátorové batérie, 3 tlmivky a 1 odpor. Varianta 2 je kombinácia štyroch filtrov pre rády harmonických 2, 3, 4 a 5, kde sú všetky filtre typu 1, teda jednoduché sériové filtre druhého rádu. Táto varianta obsahuje taktiež 8 súčiastok a to 4 kondenzátorové batérie a 4 tlmivky. Odporový člen vo filtri prvého typu, jednoduchý sériový filter druhého rádu, tvorí vinutie tlmivky, preto ho nemôžeme brať ako reálnu súčiastku. Analýzou potlačenia vyšších harmonických napätí sme zistili, že varianta 2 potlačila napätie v prípade 6. harmonickej lepšie ako varianta 1, tá však lepšie potlačila napätie v prípade 3. harmonickej, no tieto rozdiely sú ledva badateľné. Rozdiel v oboch variantách je viditeľný v ich činných stratách. Podľa strát sa varianta 1 javí ako výhodnejšie riešenie filtrácie, keďže straty sú omnoho nižšie. Z hľadiska konštrukčného prevedenia má varianta 1 zložitejší filter, ide o filter 3. typu teda C-type filter, no varianta 2 má zase o jeden filter viac. Obe varianty kompenzujú jalový výkon v hodnote 53 MVar, čo bol jeden z požiadaviek filtrovania. Keďže sa z hľadiska potlačenia vyšších harmonických napätí obe varianty javia ako použiteľné, nemôžeme z tohto kritéria jednoznačne povedať, ktorá varianta je výhodnejšia. Rohodujúce kritérium preto bude tvoriť ekonomická analýza (Kapitola 8).

8. Ekonomické porovnanie zapojení oboch variánt filtrov

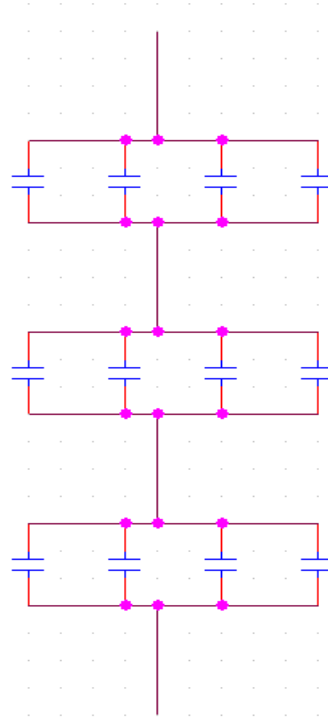
Pre ekonomické porovnanie použijeme hodnotiace kritérium NPV. NPV určíme vzťahom (4.1), kde si najskôr musíme vypočítať toky hotovosti za každé obdobie. Na výpočet hotovostných tokov použijeme priamu metódu (4.2). Všetky ceny boli stanovené hrubým odhadom a nemusia zodpovedať skutočnosti.

8.1 Výdaje

Výdaje oboch variánt tvoria činné straty filtra, jeho údržba, obsluha a samotná investícia. Investícia sa skladá z ceny komponentov a montáže filtra.

8.1.1 Ceny komponentov a montáž

Ceny jednotlivých komponentov pre obe varianty sú uvedené v tabuľke (Tab. 7 a, b), ceny sú uvedené v Kč. Cenu tlmiviek sme určili podľa jej indukčnosti a to v priamej úmere. Kondenzátorové batérie sa skladajú z viacerých dielčích kondenzátorov, ktoré sme skladali ako 3x sériová kombinácia štyroch paralelne zapojených kondenzátorov (obr.16). Cenu 1 kondenzátora sme znovu určili podľa jeho kapacity v priamej úmere. Cenu odporu sme vypočítali znovu na jednotku Ohmu [Ω], avšak odpor sa v našom zapojení reálne nachádza len v C-type filtri, pretože v jednoduchom sériovom filtri odpor tvorí vinutie tlmivky. Poslednou položkou investície bola samotná montáž filtra, ktorá sa skladá z terénnych úprav, vyplatenia pracovníkov a materiálu pre samotnú montáž. Túto položku sme odhadli ako 10% z celkovej hodnoty filtra. Investícia pre prvú variantu nám vyšla v hodnote 9 785 164 Kč a pre druhú variantu 7 207 104 Kč. Z hľadiska opotrebovania kondenzátorových batérií bude nutné v polovici obdobia životnosti filtrov tieto zariadenia vymeniť.



Obr. 16 Radenie jednotlivých kondenzátorov v kondenzátorovej batérii.

Investícia (Kč)	2.harmonická	3.harmonická	4.harmonická	
Odpor	254088	0	0	
Kondenzátor	3409446	2352441	664068	
Tlmivka	691251	761178	763131	
Montáž	435479	311362	142720	Celkom
Spolu	4790264	3424981	1569919	9785164

Tab. 7a – Ceny jednotlivých komponentov a montáže filtrov pre variantu 1.

Investícia (Kč)	2.harmonická	3.harmonická	4.harmonická	5. harmonická	
Odpor	0	0	0	0	
Kondenzátor	1022285	1363392	750021	477239	
Tlmivka	669621	757222	756195	755938	
Montáž	169191	212061	150622	123318	Celkom
Spolu	1861096	2332676	1656837	1356494	7207104

Tab. 7b – Ceny jednotlivých komponentov a montáže filtrov pre variantu 2.

8.1.2 Straty, údržba a obsluha

Ďalšie výdaje tvoria straty, údržba a obsluha filtrov. Sadzbu za 1Mwh elektrickej energie sme určili na 1500 Kč. Filtre obsluhuje v jednotlivých smenách celkom 5 pracovníkov s hrubou mesačnou mzdou 36 000 Kč. Údržba sa bude vykonávať každý rok, kedy je nutné zaplatiť 5 pracovníkov na 10 hodín so sadzbou 600 Kč/h. Celkové výdaje na 1 rok za straty, údržbu a obsluhu pre obe varianty sú uvedené v tabuľkách (Tab. 8 a, b).

Tab. 8a	V jednotkách	V Kč
Straty [MWh]	11685.84	17528760
Údržba		30000
Obsluha		2160000

Tab. 8a – Ceny strát, údržby a obsluhy filtrov pre variantu 1 na 1 rok.

Tab. 8b	V jednotkách	V Kč
Straty [MWh]	23056.32	34584480
Údržba		30000
Obsluha		2160000

Tab. 8b – Ceny strát, údržby a obsluhy filtrov pre variantu 2 na 1 rok.

8.2 Príjmy

Okrem samotného filtrovania harmonických majú filtre za úlohu kompenzovať jalový výkon. Tento kompenzovaný výkon predstavuje celkové príjmy tohto projektu. Obe varianty boli navrhnuté na kompenzáciu jalového výkonu vo výške 53 MVar. Cena za 1 MVar jalového výkonu je 110 Kč. Príjmy, teda hodnota kompenzovaného výkonu za 1 rok, sú uvedené v tabuľke (Tab. 9).

Tab. 9	V jednotkách	V Kč
Komp. výkon [MVar]	464280	51070800

Tab. 9 – Kompenzačný výkon a jeho hodnota oboch variant na 1 rok.

8.3 Tok hotovosti CF

Na výpočet toku hotovosti sme použili priamu metódu -vzťah (4.2). Jednotlivé toky hotovosti oboch variánt za každé obdobie sú znázornené v tabuľke (Tab. 10 a, b).

Doba (roky)	Príjmy	Výdaje	Cashflow (CF)
0	0	9785164.103	-9785164.103
1	51070800	19718760	31352040
2	51070800	19718760	31352040
3	51070800	19718760	31352040
4	51070800	19718760	31352040
5	51070800	19718760	31352040
6	51070800	19718760	31352040
7	51070800	19718760	31352040
8	51070800	19718760	31352040
9	51070800	19718760	31352040
10	51070800	26787310.5	24283489.5
11	51070800	19718760	31352040
12	51070800	19718760	31352040
13	51070800	19718760	31352040
14	51070800	19718760	31352040
15	51070800	19718760	31352040
16	51070800	19718760	31352040
17	51070800	19718760	31352040
18	51070800	19718760	31352040
19	51070800	19718760	31352040
20	51070800	19718760	31352040

Tab. 10a – Výpočty hotovostných tokov za každé obdobie životnosti pre variantu 1.

Doba (roky)	Príjmy	Výdaje	Cashflow (CF)
0	0	7207104	-7207104
1	51070800	36774480	14296320
2	51070800	36774480	14296320
3	51070800	36774480	14296320
4	51070800	36774480	14296320
5	51070800	36774480	14296320
6	51070800	36774480	14296320
7	51070800	36774480	14296320
8	51070800	36774480	14296320
9	51070800	36774480	14296320
10	51070800	40748710.7	10322089.3
11	51070800	36774480	14296320
12	51070800	36774480	14296320
13	51070800	36774480	14296320
14	51070800	36774480	14296320
15	51070800	36774480	14296320
16	51070800	36774480	14296320
17	51070800	36774480	14296320
18	51070800	36774480	14296320
19	51070800	36774480	14296320
20	51070800	36774480	14296320

Tab. 10b – Výpočty hotovostných tokov za každé obdobie životnosti pre variantu 2.

8.4 Čistá súčasná hodnota NPV

Na porovnanie zapojení filtrov nás bude zaujímať čistá súčasná hodnota, NPV, týchto projektov. NPV vypočítame podľa vzťahu (4.1), kde CF budú tvoriť hodnoty z tabuľky (Tab. 10 a, b), doba t bude 0 až 20 rokov a diskont $r=4\%$. Výsledky NPV sú uvedené v tabuľke (Tab. 11).

Tab.11	NPV
Varianta 1	411524031
Varianta 2	184399702

Tab. 11– Čísá súčasná hodnota NPV oboch variánt.

8.5 Porovnanie

Podľa stanoveného hodnotiaceho kritéria NPV nám vyšlo, že Varianta 1 je ekonomicky výhodnejšia voľba pre filtrovanie daného zariadenia. Napriek tomu, že počiatočná investícia do filtrov vo variante 1 je vyššia ako vo variante 2, má varianta 1 oveľa nižšie straty, čo sa nám odzrkadlilo v jednotlivých peňažných tokoch a preto by mala byť správnu voľbou pre filtrovanie takto zadanej oblúkovej pece.

Záver

Popísali sme problematiku rušenia v sieti spôsobeného vyššími harmonickými, ako vznikajú a čo môžu spôsobiť. Zoznámili sme sa s právnymi predpismi ČSN EN, odkiaľ sme získali limity pre veľkosti jednotlivých napätí vyšších harmonických. Analýzou princípu filtrácie sme získali vzťahy pre návrh troch druhov filtrov, ktoré sú: jednoduchý sériový filter druhého rádu, zatlmený filter druhého rádu a C-type filter. Tieto jednotlivé filtre a ich kombinácie sme použili na porovnanie filtračno- kompenzačných zariadení pre oblúkovú pec. Po preštudovaní zadania sme pomocou vzťahov potrebných pre návrh filtrov určili parametre R,L,C oboch variánt zapojení filtrov (Tab. 5 a, b). Následne sme vytvorili frekvenčnú amplitúdovú charakteristiku (Obr. 13 a, b). Potlačenie harmonických napätí je vidieť na obrázku (Obr. 14 a, b), filtrovanie dopadlo úspešne, teda všetky napätia harmonických sú pod limitom určeným normou, preto výsledok technického porovnania nie je smerodatný pre výber varianty filtrovania. Pomocou filtrov sme vykompenzovali jalový výkon 53 MVA_r, z čoho plynú všetky naše príjmy pre obe varianty. Následne sme vytvorili ekonomický model, kde sme po priradení jednotlivých položiek k príjmom a výdajom vypočítali peňažný tok CF tabuľka (Tab. 10 a, b) a NPV tabuľka (Tab. 11). Po porovnaní NPV oboch variánt nám vyšlo, že varianta 1 je ekonomicky výhodnejšia. Tento výsledok vyplýva z rozdielu činných strát oboch variánt, kde varianta 2 má omnoho vyššie straty, čo sa prejavilo v položkách výdajov a priamo ovplyvnilo peňažné toky za jednotlivé obdobia.

Literatúra

[1]J. Arrillaga, N.R. Watson:Power System Harmonics, 2003, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-85129-

5<http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/0470871229;jsessionid=6868DF929D81CFFCF68D03D1DFAF81B0.f02t03>

[2] J. Tlustý a kol.:Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích

[3] Prednášky predmetu Elektrické zdroje a soustavy, katedra elektroenergetiky, dostupne na odkaze: https://www.powerwiki.cz/attach/EZS/prednaska_2.pdf

[4] ČSNEN 50160

[5] Návrh filtrov vyšších harmonických (cv.5), filterdesign.nb

<https://www.powerwiki.cz/wiki/EZS>

[6] Výpočet šírenia flicker efektu, filtre vyšších harmonických, cvicenie 4

<https://www.powerwiki.cz/wiki/EZS>