

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výpočty impedance v závodových sítích

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Arseniy KOTELNIKOV**
Osobní číslo: **E10B0053P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Výpočty impedance v závodových sítích**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V souvislosti s velkým množstvím měničů v průmyslových závodech se snižuje kvalita napájecího napětí v rozvodech závodů. Roste navíc riziko rezonančních jevů. Průmyslové podniky jsou specifické velmi proměnnou strukturou rozvodů a zátěží. Pro vyšetření těchto problémů je třeba znát impedanci sítě.

1. Popište problematiku EMC v nízkofrekvenční oblasti, zdůvodněte nutnost výpočtů impedance sítě.
2. Určete typické struktury zapojení v závodech, vyznačující se specifickým charakterem průběhu impedance.
3. Pro tyto struktury vypočítejte impedanci. Výsledky analyzujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku elektromagnetické kompatibility v nízkofrekvenční oblasti a na nutnosti výpočtu impedance sítě. Kromě toho v této práci budou probrány typické struktury zapojení v závodech, vyznačující se specifickým charakterem průběhu impedance. Dále bude vysvětlována nutnost výpočtu impedance průmyslové sítě na praktickém příkladu. Budou podrobně projednány impedanční charakteristiky v komplexní rovině a v závislosti na frekvenci.

Klíčová slova

Impedance, elektromagnetická kompatibilita, rezonanční frekvence, kompenzační účinek, filtrační účinek, frekvenční charakteristika, paralelní rezonance, impedanční charakteristika.

Abstract

In this barchelor's paper we will examine the problems of electro-magnetic compatibility in the field of low frequencies and more over the necessity of calculation of the net's impedance. Furthermore, we will examine the typice structure of factories' joints, which are caused by specific type of impedance. Then we will explain with example of the necessity compute impedance of the industrial networks. Impedance characteristics will be considered in details in the complex plane and depending on the frequency.

Keywords

Impedance, electromagnetic compatibility, the resonant frequency, the compensation effect, filtering effect, frequency response, parallel resonance, the impedance characteristics.

Prohlášení

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.

.....
podpis

V Plzni dne 22.7.2013

Arseniy Kotelnikov

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	11
1 PROBLEMATIKA EMC	12
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	12
1.2 EMC V NÍZKOFREKVENČNÍ OBLASTI	13
1.3 AMPLITUDOVÝ ZÁKON.....	17
2 IMPEDANCE SÍTĚ	19
2.1 PROČ JE NUTNO VYPOČÍTAT IMPEDANCE SÍTĚ.	20
2.2 ZPŮSOB VYPOČTU IMPEDANCE SÍTĚ	21
2.3 ZOBRAZENÍ IMPEDANCE	22
3 PRŮBĚH A VÝPOČTY IMPEDANCE	23
3.1 VÝPOČTY IMPEDANCE SÍTĚ	25
3.2 ZOBRAZENÍ PRŮBĚHU IMPEDANCE.....	28
4 ZÁVĚR	33
5 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	35
6 PŘÍLOHA	36

Seznam symbolů a zkratek

a_0	Stejnosemřná složka Fourierovy řady
a_h, b_h	Fourierovy koeficienty pro h-tou harmonickou
c_h	Fyzicky měřitelná amplituda
c_k	Kapacita vedení vztažená na 1 km délky
C_F	Kapacita filtru
C_V	Kapacita vedení
C_K	Kapacita kompenzačního kondenzátoru
$f(t)$	Periodická funkce
h	Řád harmonické
$i_R(t)$	Odebíraný proud na trojfázovém usměrňovači
i_r	Poměrný rozběhový proud motoru
I_d	Diodový proud
I_h	Velikost proudu h-te harmonické
I_{1max}	Amplitudy proudu první harmonické
k_{vf}	Koeficient zvýšení impedance harmonickými
l	Délka vedení
L_{ss}	Indukčnost ve stejnosměrném obvodu
L_{vs}	Indukčnost na vstupu
L_F	Indukčnost filtru
L_S	Indukčnost nadřazené elektrizační soustavy
L_T	Indukčnost transformátoru
L_{AM}	Indukčnost asynchronního motoru
L_{SM}	Indukčnost synchronního motoru
L_V	Indukčnost vedení
p	Počet paralelních větví ve venkovním nebo kabelovém vedení

P_{AM}	Činný výkon asynchronního motoru
P_S	Činný výkon spotřebiče
ΔP_k	Ztráty transformátoru nakrátko
r_k	Činný odpor vedení vztažený na 1 km délky
R	Činný odpor obecně
R_F	Činný odpor filtru
R_{SP}	Činný odpor spotřebiče
R_T	Činný odpor transformátoru
R_V	Činný odpor vedení
R_{AM}	Činný odpor asynchronního motoru
R_{SM}	Činný odpor synchronního motoru
S_k	Zkratový výkon napájecí soustavy
S_{KS}	Zkratový výkon
S_{SM}	Zdánlivý výkon synchronního motoru
S_T	Zdánlivý výkon transformátoru
Q_{KB}	Kompenzační výkon kondenzátorové baterie
t	Čas
T	Perioda střídavého napětí a proudu
u_k	Napětí nakrátko transformátoru
U_m	Amplituda napětí
U_V	Vztažné napětí
U_T	Napětí transformátoru
U_N	Jmenovité síťové napětí
X	Reaktance obecně
X_{CF}	Reaktance kondenzátoru z filtru
X_{LF}	Reaktance cívky z filtru
x_k	Reaktance vedení vztažená na 1 km délky
x_d	Poměrná subtransitorní reaktance motoru

X_K	.....	Reaktance kondenzátorové baterie
X_V	.....	Reaktance vedení
X_{AM}	.....	Reaktance asynchronního motoru
X_{SM}	.....	Reaktance synchronního motoru
Y	.....	Admitance obecně
Y_C	.....	Celková admitance sítě
Z	.....	Impedance obecně
Z_C	.....	Celková impedance sítě
Z_F	.....	Impedance filtru
Z_S	.....	Impedance nadřazené soustavy
Z_T	.....	Impedance transformátoru
Z_V	.....	Impedance vedení
Z_{AM}	.....	Impedance asynchronního motoru
Z_{SM}	.....	Impedance synchronního motoru
η	.....	Účinnost motoru
φ_h	.....	Počáteční fáze harmonických
$\omega = 2\pi f$	.....	Úhlový kmitočet
$\cos \varphi_k$	.....	Účinitk pro chod motoru nakrátko
\dot{C}_h	.....	Obousměrné matematické spektrum
MATLAB	.....	Matrix laboratory

Úvod

Moderní řídicí elektronika se stává objektem rušivých signálů rovněž v nejširším kmitočtovém spektru. Předkládaná práce je zaměřena na potřebě výpočtu impedance sítě, problematice elektromagnetické kompatibility a na typické struktuře zapojení v závodech.

Tato bakalářská práce je rozdělena do tří částí: první část je věnována problematice elektromagnetické kompatibility (EMC), druhá uvádí teorii a potřebu výpočtu impedance sítě. Třetí část popisuje jedno z klasických zapojení, jeho náhradní schéma, charakteristiky a práce s nimi. V této části jsou též popsány výpočty impedance a impedanční charakteristiky konkrétního zapojení. A vplyvající údaje z uvedených charakteristik jsou poté porovnány a vyhodnocovány.

1 Problematika EMC

Na začátku je potřeba uvést, že elektromagnetická kompatibilita (EMC) patří mezi důležité oblasti současné elektrotechniky a přitahuje pozornost zejména elektrotechnického zaměření. Během historického vývoje této oblasti, problematikou EMC se zabývaly především pracoviště radiotechniky, telekomunikační techniky a měření z toho důvodů, že významnější projevy se objevovaly v oblasti rádiových přenosů. Kvůli rozvoji elektroniky a výkonové elektroniky, vznikla potřeba jejího vniknutí do výkonových elektrotechnických systémů, důsledkem čehož bylo označení EMC jako podstatné součástí jejich hodnocení při uvádění na trh a provozování. Nelineární spotřebiče způsobují vznik takových nepříznivých jevu jako nízkofrekvenční nebo vysokofrekvenční rušení. Moderní řídicí elektronika se stává objektem rušivých signálů rovněž v nejšířším kmitočtovém spektru. Příčinou možného zhoršení kvality elektrické energie v závodových sítích je rostoucí počet drobných spotřebičů a zvyšující jednotkový výkon. Jinak plyne, že během vývoje, nejen v průběhu technologických příprav, ale též příprav konstrukčních, výrobě a zkouškách je pak potřeba vzít v úvahu požadavky EMC.

1.1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita je moderní termín, který se vztahuje na takové známé jevy, jako je elektromagnetické rušení, dopad na sítě, přepětí, kolísání napětí sítě, elektromagnetické vlnění, falešná spojení atd.

Existuje několik definic "Elektromagnetické kompatibility". Takže standardní VDE 0870 (Společnost německých elektrotechniků) definuje EMC jako "schopnost elektrického zařízení uspokojivě fungovat v jeho elektromagnetickém prostředí bez ovlivnění tohoto prostředí, které také patří k dalším zařízením, nepřijatelným způsobem". [1]

Základní pojmy v teorii elektromagnetické kompatibility jsou pojmy vysílačů a přijímačů elektromagnetické energie (elektromagnetické rušení) ve svém širokém slova smyslu.

V elektroenergetice jsou vysílače elektromagnetických vlivů, které mohou působit na automatické systémy řízení na objektech elektrotechniky. Mezi ně patří:

1. Přechodné jevy ve vysokonapěťových obvodech pro spínací jističů a vypínačů.
2. Přechodné jevy při vysokých napětích po zkratu, spouštěcí jiskřiště, nebo svodičů přepětí.
3. Rychlé přechodné jevy po spínání indukčních obvodů při nízkém napětí.
4. Elektromagnetické poruchy v obvodech při provozním proudu.

5. Přejídné jevy v obvodech různých napěťových tříd od blesku přímo do (nebo v blízkosti) objektu. [1]

V dnešní době se nasazuje v průmyslových závodech velké množství moderních polovodičových měničů. Samozřejmě je v moderním elektrickém pohonu spousta výhod pro praxi. Nicméně, hlavním «znečišťovatelem» elektrické sítě je elektrický pohon, kvůli použití polovodičových měničů. Na jedné straně, činnost technických prostředků k vytvoření více či méně odlišné elektromagnetického rušení. «Znečištění» pracovního prostředí, které se tyto poruchy vyvolá. Na druhé straně, velmi citlivé elektronické zařízení na různé elektromagnetické vlivy. V důsledku takového zásahu, existují různé poruchy zařízení, což vede k jeho selhání, nehody a pády. Proto existuje pojem elektromagnetická kompatibilita (EMC). Což vyjadřuje celý odpor, který se uvedenou problematikou zabývá. Shrňeme-li vše, co bylo výše uvedeno, můžeme říci, že vzhledem k tomu, že relativně malé vzdálenosti od digitálního zařízení a stavebních vozidel jsou schopna nést velké proudy a potenciál, stejně jako vytvořit elektromagnetické pole vysoké intenzity. Jinými slovy, definice dle normy stanovuje, že: «Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoliv v tomto prostředí». [1], [2].

Měniče můžeme rozdělit podle působení jejich charakterem činnosti na:

- a) Zdroj nízkofrekvenčního rušení
- b) Spotřebič, na který působí vnější rušivé vlivy
- c) Zařízení, které svým provozem ruší samo sebe.

Kromě toho ve frekvenčním pásmu lze provést rozdělení na:

- a) Nízkofrekvenční rušení (0 - 2500 Hz)
- b) Vysokofrekvenční a impulzní rušení (dnes je udávané pásmo 9 kHz - 1 GHz). [2]

1.2 EMC v nízkofrekvenční oblasti

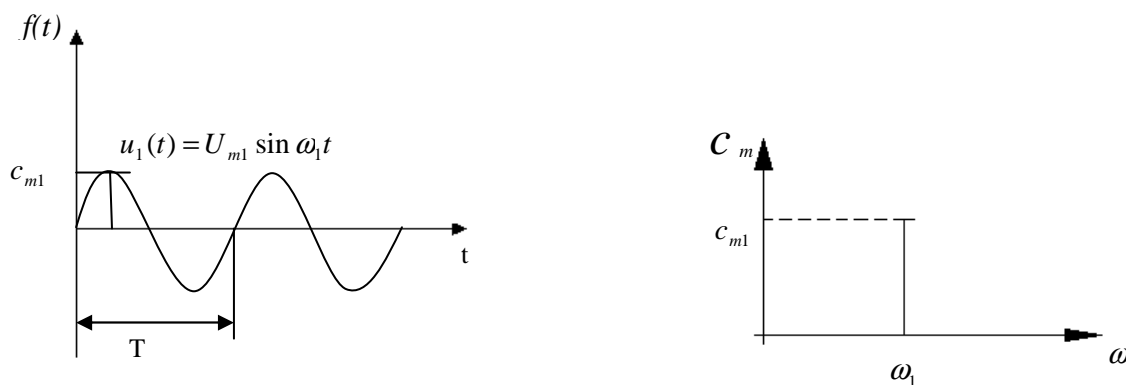
EMC v nízkofrekvenční oblasti se zabývá hodnocením kvality sítě, kvality odebírané energie, kompenzačních a filtračních prostředků. Zabývá se také kvalitou síťového napájení a parametrů zařízení při deformaci síťového napětí. [2]

Když hovoříme o EMC, pak se setkáváme s pojmem rušení. Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, rušení lze dělit podle frekvencí na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Toto rozdělení v určitém rozsahu je konvenční a závisí na typu zařízení a analyzovaného parametru (signálu). Což znamená, že pomocí spektrální analýzy průběhů napájecího napětí lze určit

hodnoty harmonických složek, které s ohledem na základní harmonické složky se chová jako vysokofrekvenční. Zároveň v případě vzniku parazitní modulace v obvodu, která má frekvenci o něco nižší než pracovní pro uvedený obvod, tak se jedná o nízkofrekvenční rušení, i přes to, že frekvence samotné poruchy je vysoká. Proto je nutno provádět frekvenční rozdělení poruch v každém jednotlivém případě. Občas rozlišujeme tři skupiny: nízkofrekvenční, střední a vysokofrekvenční. [1]

Nízkofrekvenčním rušením se nazývá zhoršení kvality síťového napájení, z důvodu rušení, které se šíří po napájecím vedení rozvodných sítí. Obvykle se vzniká kvůli působení elektroinstalace a vedení. [1]

Je zřejmé, že průběh těchto jevů je periodický (alespoň v určitém časovém intervalu), tím pádem můžeme provést harmonickou analýzu. Periodicky opakovaný děj lze vyjádřit Fourierovou řadou, která se skládá z konstant a harmonických veličin o kmitočtech rovných přirozeným násobkům základního kmitočtu. Elektromagnetické jevy lze představovat jak v časové tak i ve frekvenční oblasti (obr. 1.1). Nicméně, převodní vlastnosti a prostředky odrušení je vhodnější znázorňovat ve frekvenční oblasti, proto se tato oblast nejčastěji používá i pro rušení. Přepočítání periodických procesů z časové oblasti do frekvenční se provádí pomocí Fourierovy řady, konverze jednotlivých impulsních procesů - pomocí Fourierova integrálu.[4]



Obr. 1.1 Představa harmonického průběhu v časové a ve frekvenční oblastech.[1]

Funkci $f(t)$ budeme nazývat periodickou, pokud pro všechna t platí:

$$f(t+T) = f(t) \quad (1.1)$$

Funkci $f(t)$ musí splňovat tzv. Dirichletovy podmínky, tj. funkci musí být v intervalu $[0; T]$ jednoznačná, konečná, po částech spojitá a musí mít konečný počet maxim a minim.

Sinusové periodické funkce - např. impulsy napětí s pilovým nebo obdélníkovým průběhem v některých případech lze popsat analyticky - může být reprezentován ve frekvenční oblasti jako nekonečný součet sinusové a kosinusové oscilace tj. Fourierovy řady.

Fourierova řada periodické funkce $f(t)$ s úhlovým kmitočtem ω a frekvencí $f = \omega / 2\pi$ má tvar:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)] \quad (1.2)$$

Přičemž Fourierovy koeficienty se rovná:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt \quad (1.4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt \quad (1.5)$$

kde $h = 1, 2, \dots$

a_0 - odpovídá aritmetickému průměru hodnoty funkce času

a_h a b_h - jsou amplitudy jednotlivých kmitů.

Vzhledem k tomu, že v teorii polovodičových měničů nastávají současně případy, kdy je funkce lichá a sinusové kmity odpovídající fázovému posunu, lze představit jako kosinusové kmity, například $\sin(90 \pm \alpha) = \cos \alpha$. Proto místo normálního tvaru (1.2) se používá amplitudo-fázový tvar:

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \cos(h\omega_1 t + \varphi_h) \quad (1.6)$$

$$\text{Kde } c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}; \quad \varphi_h = -\arctg \frac{b_h}{a_h}.$$

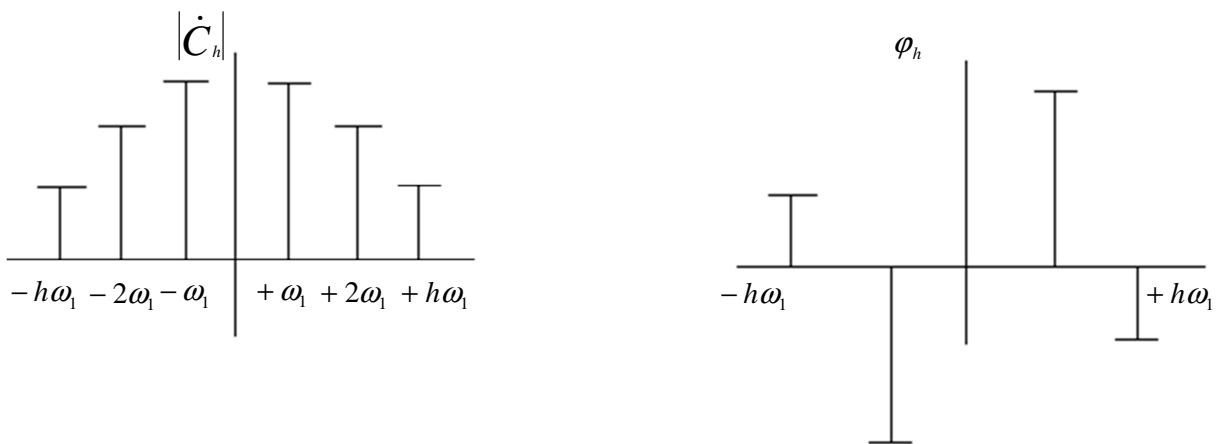
Až přidáme do výše uvedených vzorců imaginární část a použijeme Eulerovo pravidlo tak dostaneme vzorec:

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \dot{C}_h e^{jh\omega_1 t} = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (\dot{C}_{+h} e^{jh\omega_1 t} + \dot{C}_{-h} e^{-jh\omega_1 t}) \quad (1.7)$$

$$\text{kde } \dot{C}_h(\pm h\omega_1) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jh\omega_1 t} dt = |\dot{C}_h| e^{j\varphi_h} = C_h e^{j\varphi_h}, h=0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Funkce $f(t)$, která je zobrazena pomocí komplexní Fourierovy řady, je platná, proto do pravé části zavedeme zápornou frekvenci (aby se zkrátily imaginární části). Díky tomu se dostaneme k obousměrnému rozsahu (obr.1.2). Stejně reálné části (pro kladné a záporné frekvenci $\pm h\omega_1$) ze vzorců (1.7), pak vytvoří fyzicky měřitelnou amplitudu C_h přičemž:

$$|C_{-h}| + |C_{+h}| = c_h, C_0 = a_0.$$

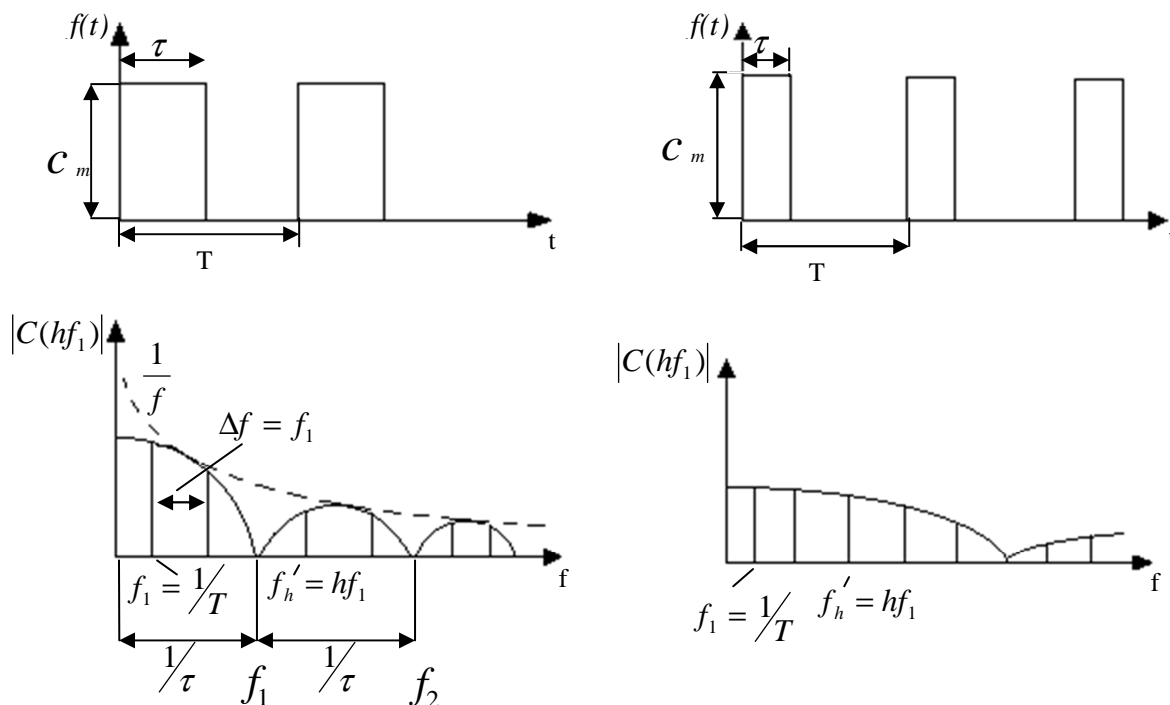


Obr.1.2. Amplitudový a fázový spektr komplexní Fourierovy řady. [2]

V analýze EMC místo obousměrného matematického spektra $\dot{C}_h = f(\pm h\omega_1)$ se často vypočítává jednostranné «fyzické» spektrum $2|\dot{C}_h| = f(\pm h\omega_1)$ jen pro kladné h , které se liší podle amplitudy koeficientem 2 oproti amplitudě oboustranného spektra. Hodnotu amplitudy jednostranného spektra lze měřit. Ta se shodují s hodnotami součinitele tvaru kosinus, tj. odpovídá podstatné částí vektoru střídavého napětí stejné frekvenci.

Na obrázku 1.3 můžeme vidět impulsy obdélníkového tvaru dvou periodicky měnící napětí se stejnou základní frekvencí, ale s různým pracovním cyklem a související linie spektra. Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že nejnižší frekvence f_1 je základní. Její hodnota je souvislá s hodnotou periody T: $f_1 = 1/T$. [1], [2]

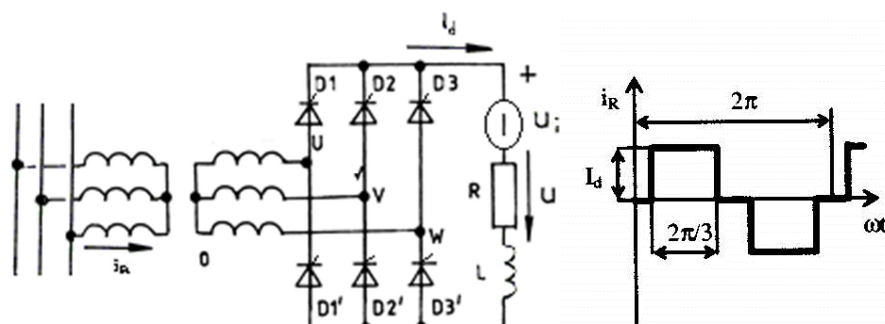
Amplitudy vyšších harmonických se vyskytují v pravidelných intervalech $\Delta f = f_1 = 1/T$ a jejich frekvence se vypočítá pomocí základního kmitočtu: $f_h = hf_1$. [1]



Obr.1.3. Linie spektra dvou periodických sledů obdélníkových napěťových impulsů s pracovním cyklem ;[1]

1.3 Amplitudový zákon

Usměrňovač, nezáleží na tom, zda řízený nebo ne, představuje nelineární zátěž. Což znamená, že proud na střídavé straně usměrňovače obsahuje kromě základní harmonické složky, složky řádů vyšších harmonických, i v případě že napájecí napětí má sinusový průběh. Pro odvození velikosti proudu vyšších harmonických vezmeme třífázový usměrňovač v můstkovém zapojení, transformátor ve spojení do hvězdy – Y/y. [2]



R S T

Obr.1.4. Řízený trojfázový usměrňovač (převzato z [3]); idealizovaný průběh odebíraného proudu (převzato z [2]).

Až provedeme Fourierovy analýzy odebíraného proudu i_R dostaneme:

$$i_R(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\frac{1}{1} \sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t - \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t + \frac{1}{11} \sin 11\omega_1 t + \dots \right) \quad (1.8)$$

Po rozboru vztahu zjistíme, že se zde vyskytují jenom harmonické určitých ráďů h:

$$h = pk \pm 1 \quad (1.9)$$

kde p je pulznost usměrňovače a k – celé číslo. Pak harmonické, splňující podmínky rovnice se nazývají charakteristické harmonické. Pro velikost proudu h – této harmonické lze napsat výraz:

$$I_h = \frac{1}{h} \cdot I_1 \quad (1.10)$$

Uvedený vztah je označován jako amplitudový zákon. A platí i pro efektivní hodnoty harmonických proudů, protože mluvíme o jednovlnných harmonických průběžích. Teď pro amplitudy první harmonické proudu pro jednotlivá zapojení lze napsat:

$$I_{1\max} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_d \text{ - pro trojpulzní spojení} \quad (1.11)$$

$$I_{1\max} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \text{ - pro šestipulzní spojení} \quad (1.12)$$

$$I_{1\max} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \text{ - pro dvanáctipulzní spojení} \quad (1.13)$$

Bohužel tento vztah platí při jednoduchých podmínkách, například: napájecí soustava je symetrická, na vstupu usměrňovače je sinusové napětí, indukčnost ve stejnosměrném obvodu

$L_{ss} \rightarrow \infty$, zkratový výkon napájecí soustavy $S_k \rightarrow \infty$, což znamená, že indukčnost na vstupu $L_{vs} \rightarrow \infty$ a ztráty usměrňovače zanedbáme. Ale v realitě nejsou uvedené podmínky ideálně splněny – příčinou je vliv úhlu komutace, zvlnění proudu a vliv nesymetrií, proto dosahují hodnoty harmonických vyšších řádů nižších hodnot. Také vznikají i tzv. necharakteristické mezi-harmonické a harmonické.[2]

2 Impedance sítě

Protože impedance je základní vlastnost, kterou potřebujeme znát pro analýzu elektrických obvodů, je třeba říct co to je a kde se vyskytují. Čili podle definice „impedance je fyzikální veličina vyjádřena komplexním číslem (obsahuje reálnou a imaginární složku) popisující zdánlivý odpor součástky a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence“ [8]. Podobně jako elektrický odpor charakterizuje vlastnosti prvku pro stejnosměrný proud, impedance charakterizuje vlastnosti prvku pro střídavý proud.

Impedance se vyskytuje na mnoha místech. Například v elektrodynamice se používají impedanční charakteristiky. Pak pomocí impedance lze provádět testování akumulčních baterií apod. V elektrotechnice pojem impedance umožňuje popsat chování dvojpólů s reaktivními vlastnostmi při působení harmonického signálu.[10]. V případě neharmonického signálu, lze impedance také použít. V předchozí kapitole bylo řečeno, že v takových případech se signál rozkládá na spektrální složky, buď pomocí Fourierovy řady nebo Fourierovy transformace, a pak se probírá vliv každé složky zvlášť.

Jak již bylo řečeno, impedance je komplexní veličina, takže se obvykle značí jako vektor \mathbf{Z} . Impedance má stejné jednotky jako elektrický odpor a reaktance, čili Ohm - Ω . Oproti elektrickému odporu u impedance jde o fázové posunutí hodnot napětí a proudů. Vypočítat impedanci můžeme buď jako poměr napětí a proudu nebo následovně.

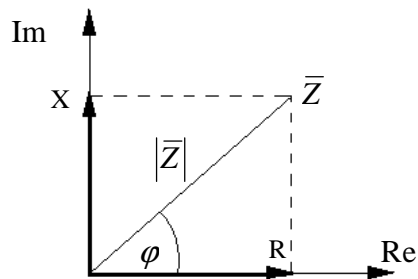
Pro impedanci odporu platí: $Z = R$

Pro impedanci cívky lze říct: $Z = j\omega L$, kde L se udává indukčnost cívky, a ω je úhlová frekvence.

Impedance kondenzátoru počítáme jako: $Z = 1/j\omega C$, kde C je kapacita kondenzátoru, a ω je úhlová frekvence.

Při čemž je nutno zmínit, že impedance je závislá na frekvenci sítě. To je vidět ze vzorce

pro úhlovou frekvenci: $\omega = 2\pi f$, kde f je frekvence.



Obr. 2.1. Impedance jako komplexní veličina.[9]

Další způsob výpočtu vyplývá z faktu, že impedance je komplexní veličina. Což znamená, že má reálnou a imaginární složku. Reálnou pak vynášíme na reálnou osu v komplexní rovině, a imaginární na imaginární osu v totožné rovině.

Poté z dané charakteristiky (obr. 2. 1.) vyplývá, že pro impedanci platí:

$$Z = R + jX = |Z| \cos \varphi + j|Z| \sin \varphi \quad (2.1)$$

Také můžeme použít tzv. Polární zápis:

$$Z = |Z| e^{j\varphi} \quad (2.2)$$

Kromě uvedených vzorečků je třeba zavést pojem absolutní hodnota impedance. Jež lze vypočítat pomocí Pythagorovy věty:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.3)$$

Z důvodu, že obvod, na který je zaměřena tato bakalářská práce je zcela nejjednodušší musíme říct o převrácené hodnotě impedance, neboli admitance sítě. Hlavní příčinou zmínění této hodnoty je fakt, že pomocí ní lze snadno vypočítat impedance pro paralelně zapojené součástky. Admitance se značí, jako Y . Obvykle se udává v jednotkách Siemens, zkratka [S]. A pro ni platí:

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (2.4)$$

2.1 Proč je nutno vypočítat impedance sítě.

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, v dnešní době se v průmyslových závodech často používají polovodičové měniče. Což ovlivňuje kvalitu napájecího napětí v rozvodech závodů. Kromě toho je zde možnost vzniku rezonance. Tedy pro výzkum vlivu polovodičových měničů je nutno znát základní vlastnosti napájecí sítě.

Pro snazší pochopení vlastnosti napájecí sítě je třeba vypočítat impedance dané sítě. Z

důvodu že na síť působí nejen polovodičové měniči ale i další nelineární spotřebiče, je nutno provádět výpočty jako funkce frekvence. Avšak při poklesu frekvencí přesnost se výpočtu velmi snižuje. Tím pádem se v praxi vypočítá do frekvencí nižších (nejčastěji do řádu $h=25$). Podle normy se vypočítá do řádu harmonické $h=40$. Je třeba poznamenat, že výpočet impedance sítě závodu není tak jednoduchý. Jedná se o následující problémy:

- 1) Vytvoření náhradních modelů jednotlivých prvků tvořících el. soustavy.
- 2) Zjednodušení vytvořeného modelu, tak aby ne došlo k velkému rozdílu mezi výchozím a zjednodušeným modelem.
- 3) Využití metody pro výpočet při zjištění impedance v určených místech závodu. [6]

2.2 Způsob výpočtu impedance sítě

Při běžných výpočtech se obvykle tvoří náhradní schémata, což lze provést pomocí běžně používaných vzorců. Ale pro harmonické vyšších řádů se vyskytují problémy s hodnotami impedance jednotlivých spotřebičů. Zpravidla platí, že například $X_L = 2\pi fL$, ale dále je indukčnost funkcí frekvence. Totéž lze říci o ostatních prvcích sítě. Z tohoto důvodu jsou zavedené korekční koeficienty pro vyšší frekvence. Samozřejmě pro přesnější výpočty je třeba mít naměřené hodnoty.

Nicméně při práci v závodových sítích vzniká opačný problém. Z důvodů, že na síť je současně připojeno hodně spotřebičů a ohledně jejich výkonu je třeba provádět zjednodušení. Což znamená, že výsledek má být takový, aby co nejvíc odpovídal provozním podmínkám, při čemž musí být přehledný a model sítě musí být lehce vytvořitelný. Ale to není jediný problém, který se vyskytuje při tvorbě modelů. Pro vhodnou práci s náhradním modelem je třeba určit, kolik je potřeba zařízení pro model. Ovšem to není moc jednoduché. Pořad je nutné brát ohled na časové a místní podmínky.

Obvykle doporučuji vždy modelovat filtry a kondenzátory. Je třeba říct, že pro automatické kompenzační stanice musíme výkon stanice přizpůsobit uvažovanému výkonu modelovaných spotřebičů s induktivním charakterem. Kondenzátory nelze zanedbat ani při výpočtech impedance. Je třeba také uvažovat venkovní a kabelové vedení VN. Ale provedení modelu záleží na délce vedení. Například u venkovních vedení modelujeme kapacitu nad 500 m. Obvykle se dělá náhrada pomocí π - článku, přičemž u krátkých venkovních vedení se používají jednodušší modely pomocí sériového RL spojení. [6]

Při modelování transformátoru záleží na jejích typu. VN/VN transformátory představují

hlavní typ, proto ty musíme vždy uvažovat. Oproti tomu pro transformátory typu VN/NN uvažujeme vždy NN modely, a v případě VN modelování musíme uvažovat jenom velké výkony. Obecně, modelování transformátoru, které napájí síť odběratelů, se provádí buď pomocí RL modelu, nebo na základě náhradního schématu. Během vytvoření náhradního schématu je taky nutné uvažovat reaktory. [6]

V případě práce se zátěží NN, když se musí provádět model VN, je možné zátěž NN modelovat pomocí kombinace $R + jX_L$, případně lze doplnit paralelně zapojenou kapacitou. Pro model NN stačí zjednodušeně provést o jeden stupeň transformace níž nebo jen u nízkých výkonů. Taky je třeba uvažovat zdroje vyšších harmonických proudů, ale modulací se provádí jenom pro výpočty vyšších harmonických napětí.

Synchronní a asynchronní motory na VN jsou obecně na takových výkonech, že jejich vliv je vysoký. Pro případ, kdy na společné sběrnici je více motorů, modelujeme jediný motor, ale s výkonem, který se skládá z výkonů všech motorů. Je třeba říct, že asynchronní motory jsou spotřebiče elektrické energie, které se používají velmi často. Především se používají motory s kotvou nakrátko. V praxi se obvykle používá náhrada pomocí RL článku. [6]

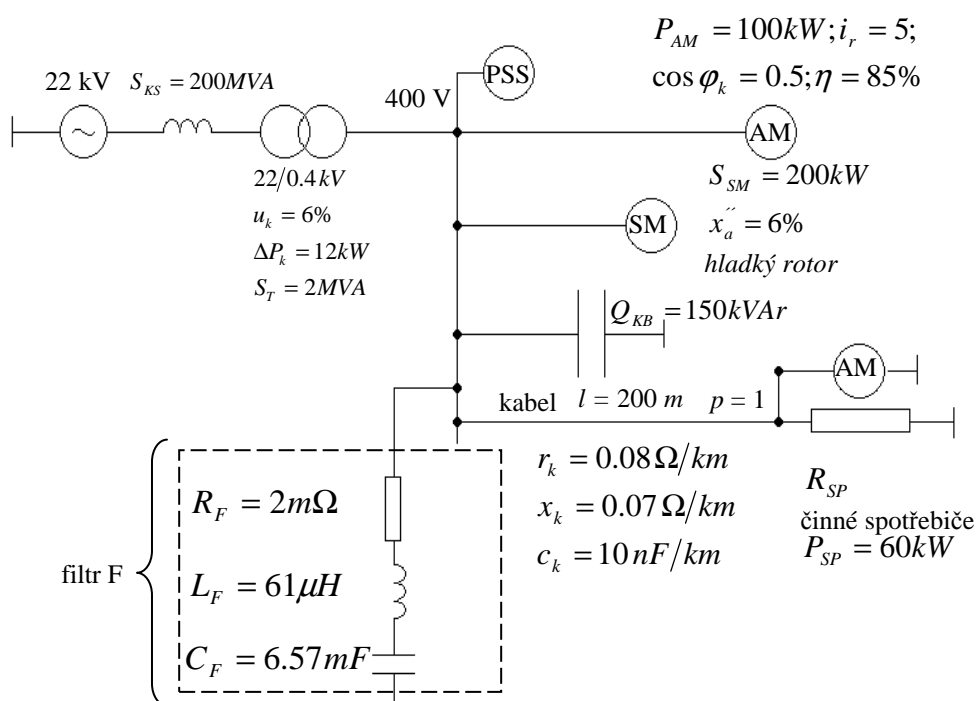
Kromě vytvoření náhradních modelů je třeba zjistit případy, při kterých dochází buď ke vzniku rezonance soustavy, nebo ke vzniku nebezpečných hodnot harmonických napětí. Kvůli tomu se v dnešní době často využívá výpočetní technika. Pomocí ní se provádí velké množství výpočtů a dělá se citlivostní analýza.

2.3 Zobrazení impedance

Jsou dva typy, jak lze zobrazit impedanci sítí. Můžeme to udělat buď v komplexní rovině, nebo znázornit jako funkci frekvencí. Výhoda druhého případu spočívá ve snadném odečtení rezonančních frekvencí a snadném sledování jejich závislosti. V případě, když znázorníme jako funkci frekvencí, tak vynášíme zvlášť složku fáze a složku amplitudy. Když chceme zjistit typ sítí podle průběhu impedančních charakteristik, obvykle se volí transformátor o výkonu 25 MVA. Pak volíme zátěže tak, aby tvořily 25%, 50% nebo 95% jmenovitého výkonu transformátoru. [6]

3 Průběh a výpočty impedance

V dnešní době v závodových sítích se často používají určité typy zařízení a součástí. Je zřejmé, že tam patří transformátory a kabelové vedení. Pak společný napájecí bod, kondenzátorová baterie a pochopitelně synchronní a asynchronní motory. Z důvodu, že v této práci není požadováno rozebrat jednotlivé typické struktury zapojení v závodech, je ale nutné ukázat, že v takových zapojeních se objevuje specifický charakter průběhu impedance, byl vytvořen následující model rozvodů, který je uveden na obr. 3.1.



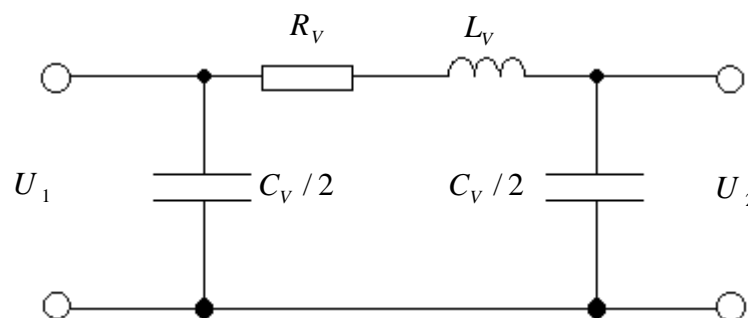
Obr. 3.1. Schéma rozvodů, s připojeným filtrem F.

Ze stejných podmínek je tam přidán filtr F. Je třeba porovnat průběh impedance v obvodu s filtrem a bez filtru. Obvykle, v případech s filtračně kompenzačním zařízením, průběh impedance samostatných filtru v komplexní rovině je skoro oválový. Nicméně z důvodů, že uvedený model se skládá nejen z RLC filtru, ale jsou tam navíc asynchronní motory a připojení je provedeno kabelovým vedením, lze očekávat zcela složitý průběh impedance. V praxi může dojít ke vzniku rezonančních frekvencí a přetížení filtru, případně i ostatních elektrických zařízení obvodu.[6],[7].

Kromě toho filtr má za úkol nejen filtrovat harmonické proudy, ale i kompenzovat induktivní jalový výkon odebíraný ze sítě. Činný odpor je dán vinutím tlumivky.

Již bylo zmíněno, že pro vhodnou práci s obvodem, čili modelem, je nutné vytvořit náhradní schéma. Je zřejmé, že náhradní model by měl být v podstatě jednoduchý, a zároveň během vytvoření, je nutné uvažovat důležité parametry výchozí soustavy.

Z důvodů, že nejsou k dispozici přesná měření harmonických napětí, nadřazenou soustavu bereme jako síť se zdrojem první harmonické. Impedance napájecí sítě je pak uvedena v náhradním schématu pomocí indukčnosti L_S . Pro modelování transformátoru jsou dva směry. Lze ho modulovat buď jako RL článek, nebo jako model, odvozený z náhradního schématu transformátoru. Ale hlavní transformátory se obvykle modelují pomocí RL modelu. Tím pádem impedance transformátoru je reprezentována jako L_T a R_T . Dále je připojen asynchronní motor. V praxi se obvykle nahrazují pomocí RL prvků. Takže impedance AM je uvedena jako R_{AM} a L_{AM} . Synchronní motor je také reprezentován jako RL článek. S ohledem na to, že kondenzátorové baterie nikdy nelze zanedbat během výpočtu impedance, tak jí musíme uvažovat i při tvorbě náhradního schématu. Čili impedance kondenzátorové baterie je dána článkem C_K . Následující kabelové vedení se nejčastěji nahrazují pomocí π -článků. Jak už bylo řečeno, při náhradě venkovního nebo kabelového vedení je třeba uvažovat jeho délku. Například, pokud se provádí modely vedení nad 4 km, tak obvykle se modelují pomocí několika π -článků. Je nutné zmínit, že důležitou roli hraje počet paralelně umístěných kabelů. Ale z důvodů, že výše uvedené vedení se skládá jenom z jednoho kabelu, nebere se ohled na to, kolik je nutno kabelů pro vedení. A náhrada pak se provádí pomocí π -článků zobrazeného na obr. 3. 2.[6].

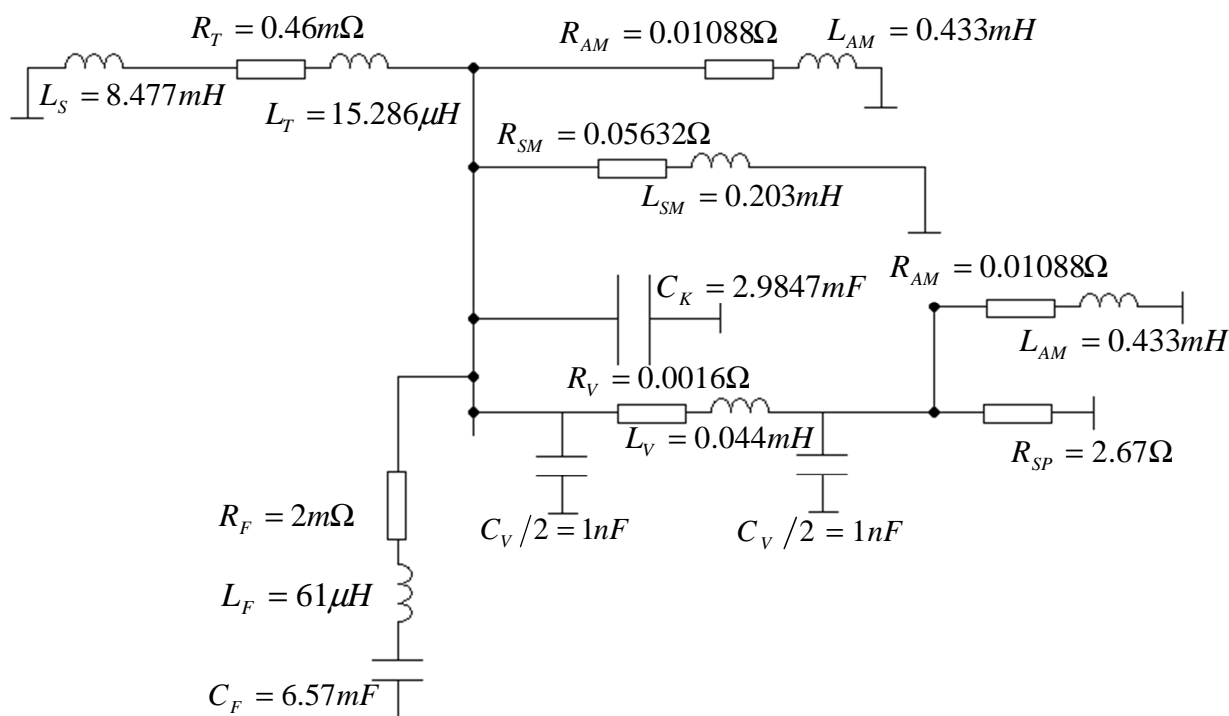


Obr. 3.2. Náhradní schéma kabelového vedení.[6]

Je třeba říct, že oba asynchronní motory mají stejné parametry. Proto není třeba popisovat náhradu druhého AM. Činné spotřebiče, které jsou dány článkem R_{SP} , pochopitelně musíme uvažovat nejen během výpočtu impedance, ale i při modelování obvodu. Filtr F je při výpočtech brán v úvaze a v náhradním modelu ho představujeme stejně jako ve výchozím. Čili jako RLC článek.

3.1 Výpočty impedance sítě

S ohledem na všechny výše uvedené podmínky a pravidla pro tvoření náhradního modelu dostaneme pak následující model (obr. 3.3.).



Obr. 3.3. Náhradní schéma rozvodů pro výpočet impedance.

Hodnoty, které jsou uvedeny na obr. 3.3. lze vypočítat z výchozích parametrů sítě na obr. 3.1. Je nutno říci, že pro výpočet impedance libovolné součástky musíme použít speciální vzorce. Pomocí zkratového výkonu sítě ve vhodném místě lze vypočítat impedanci napájecí sítě:

$$Z_S = \frac{1,1 \cdot U_N^2}{S_K} \quad (3.1)$$

V našem případě si transformátor stačí představit jako RL článek. Všechny parametry, které jsou nutné pro výpočet, známe. Tím pádem pomocí vzorců 3.2 – 3.3 dostaneme impedance a činný odpor transformátoru. Výpočty lze provést jako:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} \quad (3.2)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_T^2}{S_T^2} \quad (3.3)$$

Pro impedance obou asynchronních motorů, s ohledem na to, že účinník nakrátko je nízký, platí, že $X_{AM} = Z_{AM}$. Impedance pak vypočítáme jako:

$$Z_{AM} = \frac{U_V^2}{P_{AM}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi_k \cdot \frac{1}{i_r} \quad (3.2)$$

Pro činnou složku máme empirický vztah:

$$R_{AM} = (0.05 - 0.1) \cdot X_{AM} \quad (3.3)$$

Na rozdíl od AM, při výpočtu impedance synchronních motorů, je třeba provést korekce pro vyšší harmonické. Ve schématu na obr.3.1. je uvedeno, že máme synchronní motor s hladkým rotorem, proto se korekční koeficient k_{vf} rovná 0.88. Pak lze hodnotu činného odporu vypočítat podobně jako u AM:

$$R_{SM} = (0.08 - 0.1) \cdot X_{SM} \quad (3.4)$$

Reaktance pro SM se počítá jako:

$$X_{SM} = x_d \cdot \frac{U_V^2}{S_{SM}} \quad (3.5)$$

Impedance kondenzátorové baterie lze vypočítat zcela jednoduchým způsobem. Jelikož nejčastěji je znám instalovaný výkon baterie, pak platí:

$$X_K = \frac{U_V^2}{Q_{KB}} \quad (3.6)$$

Je zřejmé, že parametry filtru F uvedené na obr. 3.1. není třeba přepočítávat. Tím pádem výpočty dál pokračují ve směru vedení. Jak už bylo zmíněno pro výpočet impedance vedení je nutno znát některé parametry uvedeného vedení na 1 km délky (x_k, r_k, c_k). Obvykle je můžeme najít v příručkách nebo v tabulkách. Z důvodu, že jsem parametry měl zadané, nebylo třeba je hledat v tabulkách. Platí tedy:

$$X_V = x_k l \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 \quad (3.7)$$

$$R_V = r_k l \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right) \quad (3.8)$$

$$C_V = c_k l \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U}{U_V} \right)^2 \quad (3.9)$$

Ze všech hodnot impedance pak lze snadno odvodit indukčnost nebo kapacitu, záleží pak na typu součástky. Impedance filtru F je taky možno spočítat jednoduchým způsobem. Pro Z_F platí:

$$Z_F = R_F + jX_{LF} + 1/jX_{CF} \quad (3.10)$$

Z důvodu, že většina součástek je zapojena paralelně byl ve 2. kapitole zaveden pojem admitance. Čili pomocí ní můžeme vypočítat celkovou impedanci Z_C velice jednoduše. Ze vzorců 2.4. plyne, že pro celkovou admitance platí:

$$Y_C = \frac{1}{Z_{AM}} + \frac{1}{Z_{SM}} + \frac{1}{Z_S} + \frac{1}{Z_V} + \frac{1}{Z_F} \quad (3.11)$$

Z hodnoty celkové admitance pak lze spočítat jednoduchým způsobem i celkovou impedance jako:

$$Z_C = \frac{1}{Y_C} \quad (3.12)$$

Dalším krokem je sestrojít grafy závislostí impedance na frekvenci sítě a fázorový diagram pro jednotlivý případ. Je zřejmé, že počítat to ručně by bylo velice obtížné, kromě toho počítání není obsahem této bakalářské práce.

Pochopitelně pro danou práci s obvodem, čili pro výpočty a práci s grafy, je třeba využít softwarový program. Existuje mnoho snadno využitelných programů. Například HARMON nebo MATLAB. HARMON dokáže vypočítat nejen impedance sítě, ale i harmonická napětí vyšších řádů, koeficienty zkreslení napětí a mnoho jiných parametrů. Kromě toho lze síť zadat různými způsoby, třeba ve formě značek a parametrů. Oproti tomu výhoda MATLABu je nejen v jeho rozsáhlých možnostech, ale i v tom, jak široce je rozšířen v průmyslu. Je podporován řadou operačních systémů (Unix, Linux, Windows, Open VMS, IRIX, Solaris, Macintosh, HP-UX a další). Dalším plusem je, že ačkoli tento program je komerční software, existuje i jeho GNU (general public license) varianta Octave. Není to samozřejmě stejné, ale syntaxe příkazů a práce s tímto produktem je stejná jako v MATLABu. Chybí další nadstavby a vylepšení, ale pro samotné výpočty je to velmi zajímavý a finančně přijatelný nástroj studentům. Studenti též mají možnost si výhodně pořídit studentskou verzi MATLABu, kde je cena rovněž velmi příznivá oproti verzi komerční.

Z důvodu omezeného přístupu k programu HARMON a vzhledem k vysoké praxi

v následujícím programu bylo rozhodnuto pracovat v MATLABu.

3.2 Zobrazení průběhu impedance

MATLAB, nebo MATrix LABoratory, je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. Kromě toho v MATLABU je Simulink. To je nadstavba pro simulace dynamických systémů, s využitím algoritmu pro řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Přesto, že výpočet rezonanční frekvence a impedance pro danou frekvence je docela složitý a je třeba vytvořit náhradní schéma, je možné snadno provést výpočty pomocí uvedeného programu. Proces výpočtu v programu je popsán v příloze.

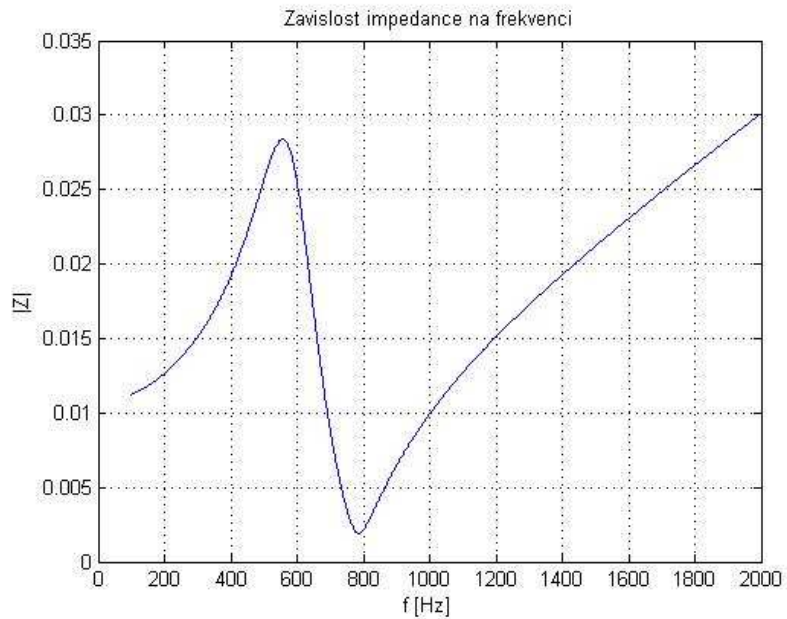
V kapitole 2.3. již bylo řečeno o tom že jsou dva typy, jak lze zobrazit impedance sítě. Buď v komplexní rovině, nebo znázornit to jako frekvenční charakteristiku. Pro snazší pochopení uvedeného obvodu je třeba znázornit obě charakteristiky.

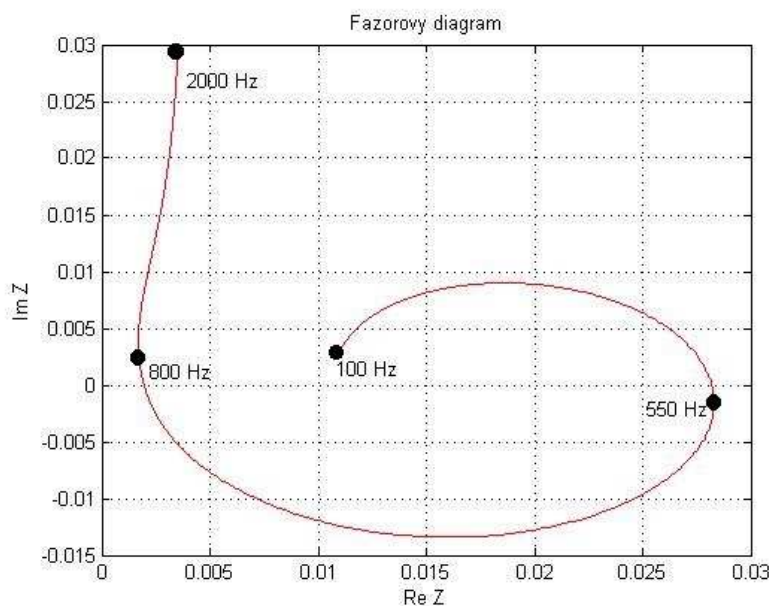
Je nutno říci, že obvykle filtr se připojí k síti pro filtrace harmonických proudů vyšších řádů. Nebo můžeme přidat filtr do obvodu, aby kompenzoval induktivní jalový výkon, který se odebírá ze sítě. To jsou základní požadavky na filtry. Průběh frekvenční charakteristiky pak záleží na charakteru obvodu. Kromě toho průběh impedance a vznik rezonančních frekvencí záleží na vlastnostech filtru. V případech, kdy máme laděný filtr základní rezonanční frekvence je závislá na harmonické, kterou je potřeba eliminovat. Oproti tomu v případě chráněné kompenzace rezonanční frekvence je daná stupněm zatlumení. Ale v síti občas dochází ke vzniku stavu které vedou k přetížení filtru (např. sací efekt). Proto v praxi filtr obvykle se podladí. [6]

Pochopitelně vznik rezonance je nežádoucí jev, což znamená, že mu musíme předcházet. Proto musíme brát ohled na impedanční charakteristiky sítě. Z důvodu, že v uvedeném na obr. 3.3. schématu parametry filtru F byly dány jako základní, není třeba, ani možnost, provadět naladění. Tím padem ze všeho vyše uvedeného plyne že v obvodě se zapojeným filtrem F pravděpodobně vyskytne rezonance.

Jak je pěkně vidět na obr. 3.4.(a) průběh impedance v závislosti na frekvence vyšel přibližně podle předpokladu. Filtr je zapojen paralelně do sítě, a z průběhu frekvenční charakteristiky vyplývá, že daný obvod lze brát jako induktivní síť. Pak také je možné definovat rezonanční frekvence a určit při které hodnotě dochází k paralelní rezonanci. Jinak

můžeme říct že f_r se rovná 800 [Hz], a paralelní rezonance je pro cca 550 [Hz]. Je taky třeba zmínit, že při porovnání frekvenční charakteristiky pro obvod s filtrem F a bez, plyne že maximální hodnota impedance pro síť bez filtru je vyšší, než při zapojení filtru. Z fázorového diagramu na obr. 3.4.(b) je vidět, že průběh impedance vypadá podobně jako u sítě RL s kompenzací. V takovém zapojení vždy dochází k rezonanci. Rozdílem je to, že impedanční charakteristika u RL zapojení s kompenzací má kruhový průběh. Jak již bylo řečeno samotný filtr má ovalový průběh impedance. Z obr. 3.4.(a) je vidět, že charakteristika při zapojení filtru má taky oválovou oblast, ale z důvodu zapojení na síť dalších součástek můžeme vidět o něco jiný tvar. V daném obvodu se jedná o zapojení do soustavy asynchronních motorů, a zároveň filtru. Je zřejmé, že filtr F má za funkcí nejen kompenzace, ale i filtrace. Kromě toho elektrický spotřebič R_s a AM jsou připojeny do sítě přes vedení, což také ovlivňuje impedanční charakteristiky.

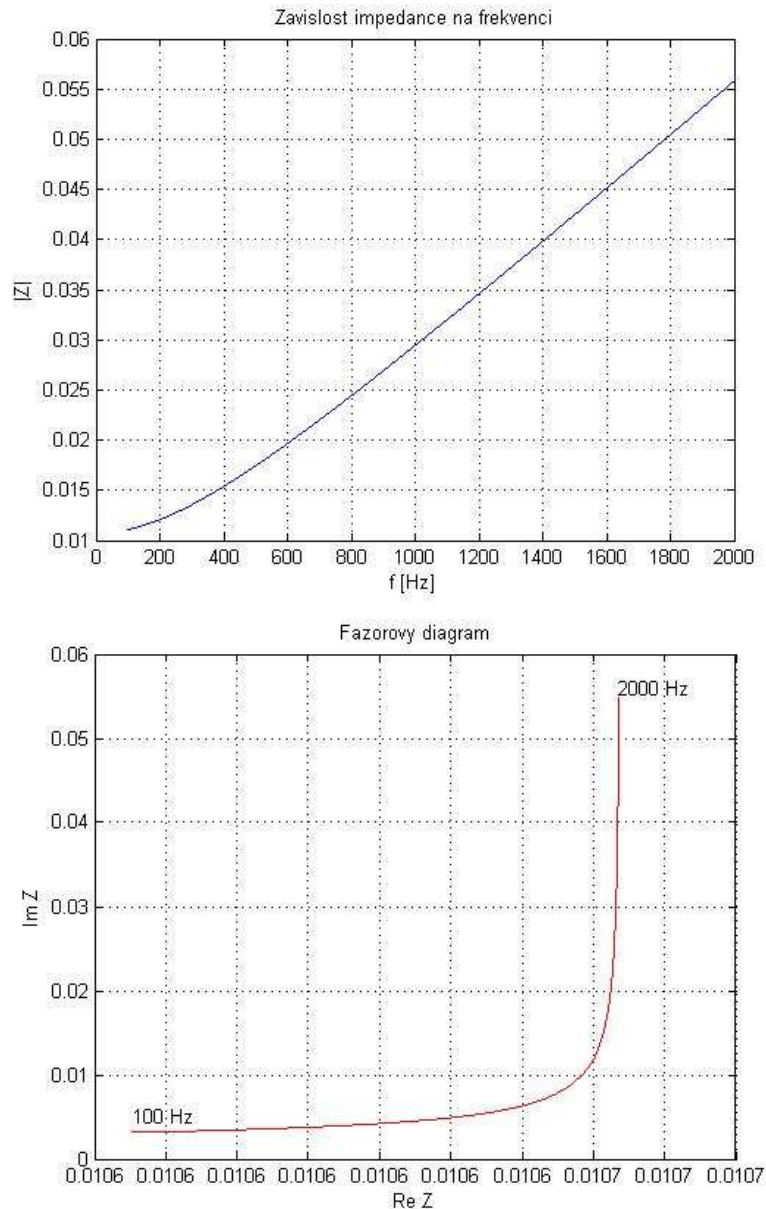




Obr. 3.4. a) Průběh impedance v závislosti na frekvenci, pro obvod s připojeným filtrem F .
b) Fazorový diagram, pro obvod s připojeným filtrem F .

Je zřejmé, že takový průběh je ovlivněn rezonancí. Při čemž z impedanční charakteristiky vyplývá, že se jedná o filtračně kompenzační zařízení. Při porovnání charakteristik znázorněných na obr. 3.4.(a) a obr. 3.4.(b) lze sledovat změny impedance v reálné a imaginární části. Čili je vidět, že paralelní rezonance odpovídá poklesu jalové složky a zároveň nárůstu ohmické složky impedance. Ale potom reálná složka taky začala klesat až do nuly. Oproti tomu při hodnotě frekvenci 650 [Hz] imaginární složka se začala zvyšovat. Je jasné vidět, že po překročení reálné osy impedanční křivka docílila bodu rezonanční frekvence. Lze to snadno zkontrolovat. Podle vzorce 2.3. dosadíme hodnoty z grafu 3.4.(b), které dle předpokladu odpovídají frekvence 800 [Hz]. Dostaneme pak, že absolutní hodnota $|Z|$ se rovná cca 0.0025, což po dosazení do grafu na obr. 3.4.(a) udává rezonanční frekvence. Dále můžeme vidět, že impedanční charakteristika se pohybuje nahoru a postupně se ustálí. To samé lze vidět i na průběhu impedance v závislosti na frekvenci. Po hodnotě 800 [Hz] charakteristika roste a má docela jednoduchý tvar. Je nutno říct, že na rozdíl od charakteristik pro odporově-induktivní zátěž s kompenzací připojenou přes vedení v uvedeném případě nedochází k „posunutí“ charakteristik podle imaginární osy.

Ale v zapojení bez filtru F vyskytuje opačná situace. Můžeme vidět na obr. 3.5. (a) a 3.5. (b), že k žádné rezonanci nedochází.



Obr. 3.5. a) Průběh impedance v závislosti na frekvenci, bez filtru F.
b) Fazorový diagram, bez filtru F.

Po celou dobu zvyšování frekvencí, impedanční charakteristika v závislosti na dané frekvenci, rovnoměrně vzrůstá. Což lze sledovat na obr. 3.5.(a). Ale průběh impedance v komplexní rovině je o něco zajímavější. Je vidět, že při frekvenci 100 [Hz] impedance má skoro konstantní imaginární složku a reálná složka roste. Nárůst pokračuje až do hodnoty 250 [Hz]. Po této hodnotě začne růst i na imaginární ose. Pak po hodnotě cca 600 [Hz], se reálná složka ustálí. Při čemž začne narůst hodnoty na imaginární ose. A to až do hodnoty 2000 [Hz] nic se nezměnilo. Je třeba říci, že na začátku impedanční charakteristiky (obr. 3.5.(b.)) pro 100 až 250 [Hz], je vidět, že charakter impedance byl takřka ohmický.

Porovnáním charakteristik pro zapojení s filtrem F a bez, lze vidět, že průběhy jsou

odlišné. Tedy můžeme říci, že zapojený filtr do sítě, který vykazuje nejen filtrační účinek, ale i kompenzační, a který zároveň není naladěn, vyvolává nežádoucí jevy, jako např. rezonance. Kromě toho v případě nepodladěného, čili přeladěného, filtru rezonanční frekvence může být vyšší než frekvence charakteristické harmonické, filtr pak má kapacitní účinek a může dojít ke vzniku rezonance v blízkosti charakteristické harmonické. To následně vede ke vzniku nebezpečně vysokých hodnot harmonických napětí. Naopak při podladění filtru, charakter filtru pro charakteristickou harmonickou je induktivní, z důvodu, že rezonanční frekvence je nižší, než je frekvence charakteristické harmonické. Ze stejných podmínek paralelní rezonance nevzniká v blízkosti charakteristické harmonické.

Je možné, že na první pohled využití filtru nemá výhodu. Ale tato součástka se používá v praxi docela často. Příčinou je, za prvé, možnost filtrace harmonických proudů vyšších řádů. Čím lze zmenšit negativní účinky, které vznikají v síti. Kromě toho, jak již bylo řečeno, je možný provádět kompenzaci indukčního jalového výkonu, odebíraného ze sítě. Hlavní výhoda spočívá v tom, že je možné regulovat filtrační a kompenzační účinky. Jinak můžeme ladit filtr dle požadavku, jak v závodovém rozvodů, tak, klidně, i jako celek na nadřazené soustavě. [6]

O tom, jaké výhody a nevýhody spočívají v zapojení filtru do závodových sítí, není třeba rozepisovat. Ale musím říci, že z impedančních charakteristik lze vidět, proč je nutné vypočítat impedance.

4 Závěr

Na závěr shrneme výše uvedené. Obsahem této bakalářské práce bylo zdůvodnit nutnost výpočtu impedance a ukázat to na konkrétním zapojení.

V kapitole 1 bylo podrobně popsáno, co je to elektromagnetická kompatibilita, kde se vyskytuje a proč je tento pojem vlastně zaveden. Jak bylo řečeno, EMC v nízkofrekvenční oblasti se zabývá hodnocením kvality sítě, kvality odebírané energie, kompenzačních a filtračních prostředků. S ohledem na ten fakt, že v dnešní době se do průmyslových sítí hodně nasazují součástky, které jde řídit pomocí elektrického pohonů, je zřejmé, že pojem EMC je nutno uvažovat. Kromě toho snižuje se kvalita napájecího napětí, což ovlivňuje parametry síťového napájení. Proto je třeba uvažovat elektromagnetickou kompatibilitu v nízkofrekvenční oblasti. Za stejných podmínek roste navíc riziko rezonančních jevů.

S ohledem na vznik nežádoucích jevů v síti je zřejmé, že je nutno těmto jevům zabránit. Proto musíme poznat parametry a vlastnosti daného obvodu, který je daný impedancí sítě. Ale protože obvykle jsou do sítí zapojeny nejen polovodičové měniče, ale i další nelineární spotřebiče, je nutno provádět výpočty jako funkce frekvence.

Dále pomocí způsobů popsaných v kapitole 2.2. byla vytvořena náhradní schéma pro síť z obr. 3.1. Podle vzorců 3.1. – 3.9. se vypočítali hodnoty nahrazujících součástek.

Charakteristiky a výpočty se provedly prostřednictvím, popsaného v kapitole 3.2., výpočtového softwaru MATLAB. Výpočty pro obvod bez filtru F jsou popsány v příloze. Vzorce pro impedance filtru jsou též uvedené v příloze, jako komentáře. Z obrázků obr.3.4.(a, b) jsou dobře patrné průběhy impedance, paralelní rezonance a rezonanční frekvence, což odpovídá předpokladům. Čili pomocí uvedených charakteristik lze definovat parametry sítě a vliv filtru F na uvedenou soustavu. Vzhledem ke vzniku rezonance a rozsahu frekvence, bylo pro přehlednost nutné zobrazit nejen maximální a minimální hodnoty frekvence, ale též hodnoty odpovídající paralelní rezonanci a rezonanční frekvence, v komplexní rovině. Grafická forma výsledků má v tomto případě vyšší vypovídající schopnost, než množina uspořádaných hodnot.

Protože do sítě jsou zapojeny nelineární spotřebiče, odebírající nesinusové proudy, můžeme definovat tyto součástky jako zdroj harmonických proudů vyšších řádů. Tedy vznikají na impedancích harmonická napětí. A právě proti tomu je třeba instalovat filtr. Při praxi je však potřebné zjistit vliv filtru na velikost harmonických napětí vyšších řádů v soustavě a též vyřešit, jaké musí mít filtr energetické parametry. Kromě toho je nutné znát postup jak filtr naladit. Dělá se to proto, že občas dochází ke stárnutí izolace kondenzátoru a

důsledkem je snížení jeho kapacity. Z čeho pak plyne pokles frekvence základní harmonické, odůvodněně může dojít k zesilovacímu účinku. Doporučuje se provádět podladění filtru, aby se ne došlo k nepříznivým jevům. Z impedanční charakteristik pro obvod bez filtru F je vidět, že pro nižší frekvenci soustavy se jeví jako impedance s ohmickým charakterem. Čili jalová složka je skoro konstantní. Ale i přes to, že charakteristika má zcela jednoduchý průběh, je třeba říci, že v zapojení bez filtru vznikají nepříznivé harmonická napětí. Jako důsledek se může pak zhoršit kvalita napájení sítě a vyskytne nízkofrekvenční porucha. Pochopitelně to není žádoucí jev.

Ze všeho výše uvedeného lze udělat závěr, že pro vyšetření nepříznivých jevu je nutno znát impedanci sítě, aby se těmto jevům zabránit. Ale musím uvést, že při výpočtech na vyšších napěťových hladinách, občas dochází k tomu, že musíme modelovat soustavy nižších napěťových hladin. Je zřejmé, že ten model musí zahrnovat nejen důležité parametry soustavy, které ovlivňují průběh impedance, ale i mít jednoduchý tvar, aby se podařilo snadno pracovat s daným obvodem.

Myslím si, že cíl této bakalářské práce byl dosažen. Byly naznačeny struktury zapojení se specifickým průběhem a výsledky byly analyzovány. Vzorce 3.1 – 3.9 a informace pro výpočet v kapitole 3.1. jsou použity ze skript [6].

5 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VYSJAŠŤEV, A.N.katedra ESVT ELTI. *Elektromagnetická kompatibilita v elektroenergetice*. Poslední změna 23.2.2013. [Cit. 23.2.2013.].Dostupné z:http://www.twirpx.com/files/tek/electromagnetic_compatibility/.
- [2] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005.180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [3] HAMMER Miloš, KRATOCHVÍL Petr, *Úvod do laboratorních cvičení z elektrotechniky*, Brno. 2006. Poslední změna 23.2.2013. [Cit. 23.2.2013.].Dostupné z: http://www.elektro.fme.vutbr.cz/studopory/elektrot/lab_03_cv.htm
- [4] SVAČINA Jiří. *Elektromagnetickákompatibilita. Přednášky*. Vysoké učení techncké v Brně. Poslední změna 26.2.2013. [Cit. 26.2.2013.].Dostupné z: http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf
- [5] KABEŠEV, A.V., OBUCHOV, S.G.*Výpočet a návrh systémů objektů a zařízení*. Poslední změna 10.5.2013. [Cit. 10.5.2013.].Dostupné z:http://window.edu.ru/resource/266/75266/files/M_Kabishev_Obuhov_Raschet.pdf
- [6] KŮS Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003.196 s. ISBN 80-7082-976-1.
- [7] KŮS Václav. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002.183 s. ISBN 80-7300-062-8.
- [8] *Impedance*. Poslední změna 13.6.2013. [Cit. 13.6.2013.].Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance>
- [9] BENEŠOVÁ Zdeňka, LEDVINOVÁ Marcela. *Základy elektrických obvodů v příkladech*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. 145 s. ISBN 978-80-7043-640-0.
- [10] PROCHOROV, A.M., *Encyklopedie fyziky. V 5 svazků. Moskva: sovětská encyklopedie*. 1988.

6 Příloha

```
clc

RAM = 0.01088;
LAM = 0.000433;
LS = 0.0084777;
RT = 0.00048;
LT = 0.000015286;
RSM = 0.05632;
LSM = 0.203;
Ck = 0.0029847;
Rf = 0.002;
Lf = 0.0000061;
Cf = 0.00675;
Cv = 0.000000001;
Rv = 0.0016;
Lv = 0.0000044;
Rsp = 2.67;

f = [100:1:2000];

XAM = 2.*pi.*f.*LAM;

XS = 2.*pi.*f.*LS;
XT = 2.*pi.*f.*LT;

XSM = 2.*pi.*f.*LSM;

Xk = 1./(2.*pi.*f.*Ck);

XLf = 2.*pi.*f.*Lf;
XCf = 1./(2.*pi.*f.*Cf);

XCv = 1./(2.*pi.*f.*Cv);
XLv = 2.*pi.*f.*Lv;

ZAM = RAM + i.*XAM;
ZS = RT + i.*XT + i.*XS;
ZSM = RSM + i.*XSM;
Zf = Rf + i.*XLf - i.*XCf;

Yvsam = 1./ZAM + 1/i.*XCv + 1/Rsp;
Zvsam = 1./Yvsam;
ZV = RAM + Zvsam + i.*XLv;

Yc = 1./ZAM + 1./ZES + 1./ZSM + 1./ZV + 1./Zf;

Zc = 1./Yc

ans = abs(Zc);

Re = real(Zc);
Im = imag(Zc);
plot(f, ans)
grid on
```

```
title('Zavislost impedance na frekvenci')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Z|')
figure

plot(Re, Im, 'R')
grid on
gtext ('100 Hz')
gtext ('550 Hz')
gtext ('800 Hz')
gtext ('2000 Hz')
title('Fazorovy diagram')
xlabel('Re {Z}')
ylabel('Im {Z}')
```