

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kompenzace účinníku v obvodech s polovodičovými měniči

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan PAŠEK**
Osobní číslo: **E12B0315P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Kompenzace účinníku v obvodech s polovodičovými měniči**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Práce je soustředěna na popis a návrh řešení soustavy rozvodů průmyslového závodu, kde jsou kromě neregulovaných motorů použity též polovodičová zařízení.

1. Popište problém odběru proudu nelineárních zařízení.
2. Popište problematiku účinníku v obvodech s nelineárními spotřebiči.
3. Navrhnete řešení kompenzace účinníku klasickou metodou a pomocí tzv. chráněné kompenzace.
4. Zvolte rezonanční kmitočet chráněné kompenzace a vypočítejte kompenzační a filtrační účinek.
5. Obě metody porovnejte.

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

1. Kůs V., Hammerbauer, J., Skála, J.: EMC výkonových polovodičových systémů. Nakladatelství BEN, 2013, 374 stran. ISBN 978-80-7300-476-7

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

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku kompenzace účinníku v obvodech s polovodičovými měniči. Tato bakalářská práce rozebírá problematiku odběru proudu nelineárních zařízení jako například usměřňovače nebo střídače. Dále pojednává o problematice účinníku v obvodech s nelineárními spotřebiči a způsoby jeho kompenzace. V závěrečné části je ukázán praktický návrh chráněné kompenzace pro určitý kmitočet s výpočtem kompenzačního a filtračního účinku dané kompenzace.

Klíčová slova

Jalový výkon, kompenzátor, kompenzace, filtr, kondenzátor, chráněná kompenzace a tlumivka.

Abstract

This beachelor thesis is focused on the issue of compensation power factor with semiconductor changers. I write in this beachelor thesis about the issue called: Current consumptioning nonlinear equipment. Like for example rectifers or inverters. I write about consumptioning reactive power in circuits with nonlinear equipment and compensation method. In the last part I show the practical proposal of protected compensation and I calculate compenzation and filtering effect.

Key words

Reactive power, compensator, compensation, filter, capacitor, protected compensation and choke.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 5.6.2015

Jan Pašek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	12
1 PROBLÉM ODBĚRU PROUDU NELINEÁRNÍCH ZAŘÍZENÍ	13
1.1 USMĚRŇOVAČE.....	15
1.2 MĚNIČE KMITOČTU.....	17
2 PROBLEMATIKA ÚČINNÍKU V OBVODECH S NELINEÁRNÍMI SPOTŘEBIČI	20
2.1 UMÍSTĚNÍ KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	23
2.2 MOŽNOSTI KOMPENZACE ÚČINNÍKU.....	23
2.2.1 <i>Kompenzace pomocí kondenzátoru</i>	23
2.2.2 <i>Chráněná kompenzace</i>	24
2.2.3 <i>Rotační kompenzátory</i>	25
2.3 MINIMALIZACE HARMONICKÝCH.....	25
2.3.1 <i>Bez pomoci přídavných zařízení</i>	25
2.3.2 <i>Pomocí dodatečných prostředků</i>	26
3 NÁVRH ŘEŠENÍ KOMPENZACE ÚČINNÍKU	27
3.1 CHRÁNĚNÁ KOMPENZACE.....	28
3.2 NECHRÁNĚNÁ KOMPENZACE.....	30
4 FILTR JAKO PRVEK SÍŤE	31
4.1 VLIV FKZ NA NAPÁJECÍ SÍŤ.....	32
4.1.1 <i>Kompenzační účinek filtrů</i>	32
4.1.2 <i>Filtrační účinek filtrů</i>	33
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43

Seznam symbolů a zkratek

C	[F]	Kondenzátor
U_0	[V]	Stejnoseměrné napětí
U_S	[V]	Sdružené napětí
U	[V]	Napětí
U_h	[V]	Harmonické napětí
U_k	[V]	Napětí nakrátko
U_C	[V]	Napětí na kondenzátoru
U_n	[V]	Jmenovité napětí
h	[-]	Řád harmonické
I_0	[A]	Stejnoseměrný proud
I_k	[A]	Proud na krátko
I_R	[A]	Proud procházející odporem
I_d	[A]	Proud procházející diodou
I	[A]	Proud
I_h	[A]	Harmonický proud
I_C	[A]	Proud tekoucí kondenzátorem
t	[s]	Čas
T	[s]	Perioda
k	[-]	Celé číslo
s	[-]	Pulznost měniče
p	[-]	Činitel zatlumení
L_{SS}	[H]	Indukčnost SS obvodu
S_{KS}	[VA]	Zkratový výkon napájecí soustavy
P	[W]	Činný výkon

Q	[VAr]	Jalový výkon
S	[VA]	Zdánlivý výkon
D	[-]	Deformační výkon
Q_C	[VAr]	Výkon kondenzátorové baterie
q	[-]	Obsah základní harmonické proudu
k	[-]	Obsah vyšší harmonické proudu
f	[Hz]	Frekvence
f_r	[Hz]	Rezonanční frekvence
f_n	[Hz]	Frekvence sítě
f_1	[Hz]	Vstupní frekvence
f_2	[Hz]	Výstupní frekvence
U_{CN}	[V]	Jmenovité napětí na kondenzátoru
X	[Ω]	Reaktance
X_C	[Ω]	Reaktance kondenzátoru
X_L	[Ω]	Reaktance tlumivky
L	[L]	Indukčnost
$X_{\text{vedení}}$	[Ω]	Reaktance vedení
X_t	[Ω]	Reaktance transformátoru
$R_{\text{vedení}}$	[Ω]	Odpor vedení
R_t	[Ω]	Odpor transformátoru
M	[-]	Motor
P_{max}	[W]	Maximální výkon
P_i	[W]	Celkový instalovaný výkon
P_p	[W]	Výpočtové zatížení
ΔP_k	[W]	Činé ztráty

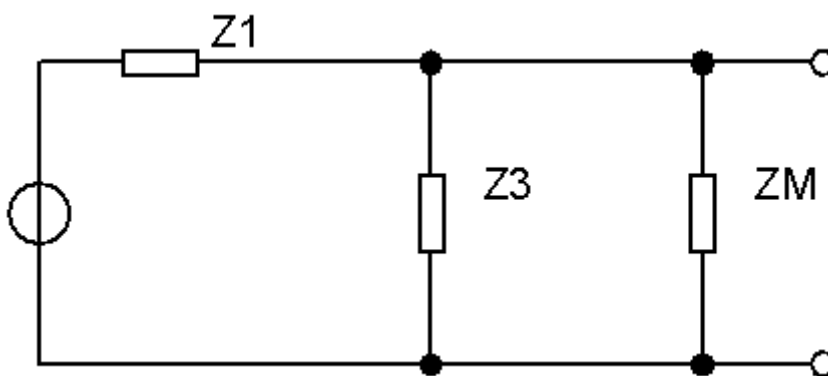
Z	[Ω]	Impedance
Z_{vedeni}	[Ω]	Impedance vedení
Z_t	[Ω]	Impedance transformátoru
Z_z	[Ω]	Impedance zátěže
Z_M	[Ω]	Impedance motoru
Z_{FKZ}	[Ω]	Impedance FKZ
Z_v	[Ω]	Impedance vedení
Z_{se}	[Ω]	Impedance napájecí sítě
Q_{LC}	[VAr]	Výkon chráněné kompenzace
X_{LC}	[Ω]	Reaktance chráněné kompenzace
β	[-]	Činitel soudobosti
φ	[-]	Účinník
λ	[-]	Skutečný účinník
η	[-]	Účinnost
μ	[-]	Úhel komutace
$\Delta\alpha$	[-]	Rozdíl úhlu řízení
Ψ	[-]	Hodinový úhel

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na zpětný vliv polovodičových měničů na napájecí síť. Text je rozdělen do pěti částí; první se zabývá problémem odběru proudu nelineárních zařízení, druhá se zabývá problematikou účinníku v obvodech s nelineárními spotřebiči. Třetí část řeší kompenzaci účinníku klasickou metodou a pomocí tzv. chráněné kompenzace. Ve čtvrté části zvolíme rezonanční kmitočet chráněné kompenzace a vypočítáme kompenzační a filtrační účinek. V závěru práce obě metody porovnááme.

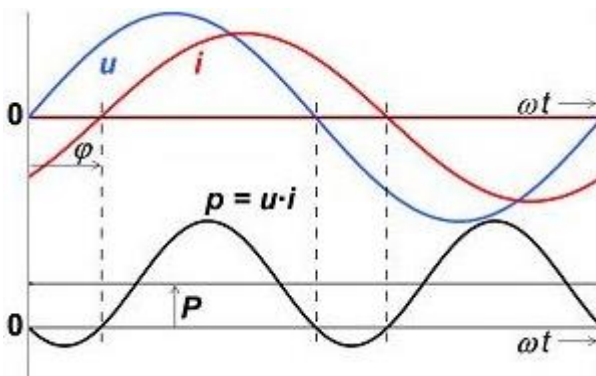
1. Problém odběru proudu nelineárních zařízení

Polovodičový měnič se chová v síti jako lineární zátěž s časově proměnnou impedancí Z_M . Jeho činností dochází k zvláštnímu případu amplitudové modulační napájecího proudu. Zatímco u běžně známé amplitudové modulační je úhlový kmitočet nosné harmonické vlny mnohem větší než úhlový kmitočet vlny modulační, je tomu u měničů obráceně. Z toho důvodu nemluvíme o modulační proudu, ale o jeho deformaci. Tímto deformovaným proudem i_M , jehož průběh se skládá ze základní harmonické a subharmonických složek, vznikají na impedanci v rozvodném systému Z_I napěťové úbytky, které se v podobě kmitočtového spektra informací o provozu měniče přenášejí k neomezenému počtu dalších odběratelů elektrické energie. Protože informace zmíněného charakteru běžný odběratel elektrické energie nemá zájem odebrat, považujeme zpětný vliv měničů na napájecí síť za nežádoucí [1].



Obr.1: Náhradní schéma měniče zapojeného v jednoduché síti

Vlivem řízení měničů dochází k posuvu proudu oproti napětí a komutaci ventilů a tím k zhoršení účinníku [1].

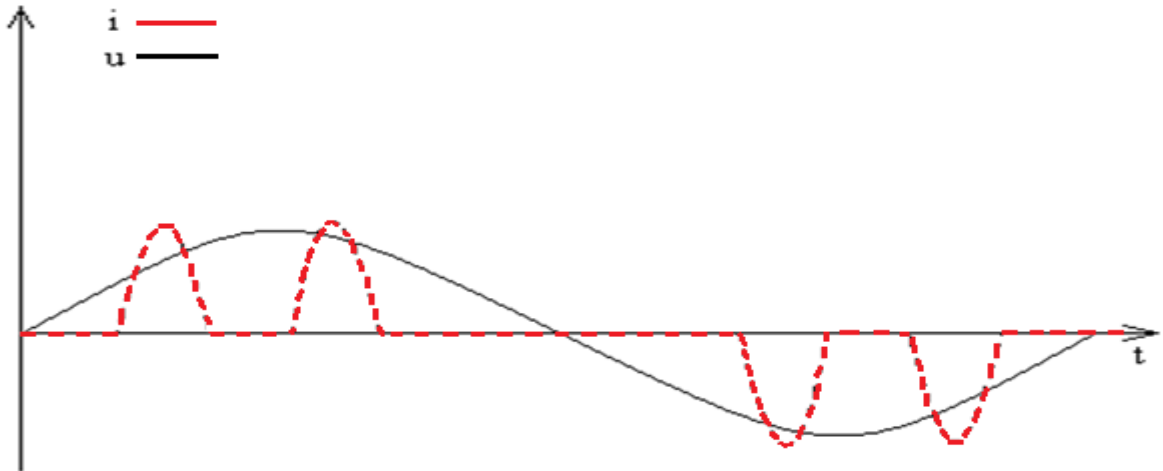


Obr.2: Posuv proudu oproti napětí

Předpoklad sinusového průběhu proudu a napětí v elektrických obvodech je určitou idealizací. Ve skutečnosti se proudy a napětí v obvodech liší od přesně sinusových průběhů vlivem nelinearity v obvodu. Tyto nesinusové průběhy proudu a napětí rozkládáme na řadu sinusových průběhů (vyšších harmonických) pomocí Fourierova teorému, tj. předpokládáme proud a napětí ve tvaru [1]:

$$u(t) = U_0 + \sum_{h=1}^q U_h \sin(h\omega t + \varphi_{U,h}) \quad 1.1$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^q I_h \sin(h\omega t + \varphi_{I,h}) \quad 1.2$$



Obr3: Časový průběh napětí a proudu , ve kterém jsou vidět vyšší harmonické

Určení maximálního řádu harmonické h . U výkonových polovodičových měničů je velikost harmonických proudů dána určitými zákonitostmi. Nejvyšších hodnot nabývají obvykle harmonické, které vyhovují rovnici $h = ks \mp 1$, kde k je celé číslo a s je pulznost měniče. Tyto harmonické se nazývají charakteristické harmonické. Ostatní harmonické, jejichž řád nevyhovuje rovnici $h = ks \mp 1$ se nazývají necharakteristické harmonické [3].

Efektivní hodnota napětí je :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\sum_{h=1}^q U_h \sin(h\omega t + \varphi_{U,h})]^2 dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^q U_h^2} \quad 1.3$$

kde U_h pro $h = 1, 2, 3, \dots$ jsou efektivní hodnoty napětí jednotlivých harmonických. Analogicky pro efektivní hodnotu proudu můžeme psát [3]:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^q I_h^2} \quad 1.4$$

pro $h = 1, 2, 3, \dots$

K posouzení deformace křivky , tj. pro posouzení množství vyšších harmonických, zavádíme tzv. obsah základní harmonické proudu , kde za horní mez q dosadíme $q = \infty$ [3] :

$$g = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \frac{I_1}{I} \quad 1.5$$

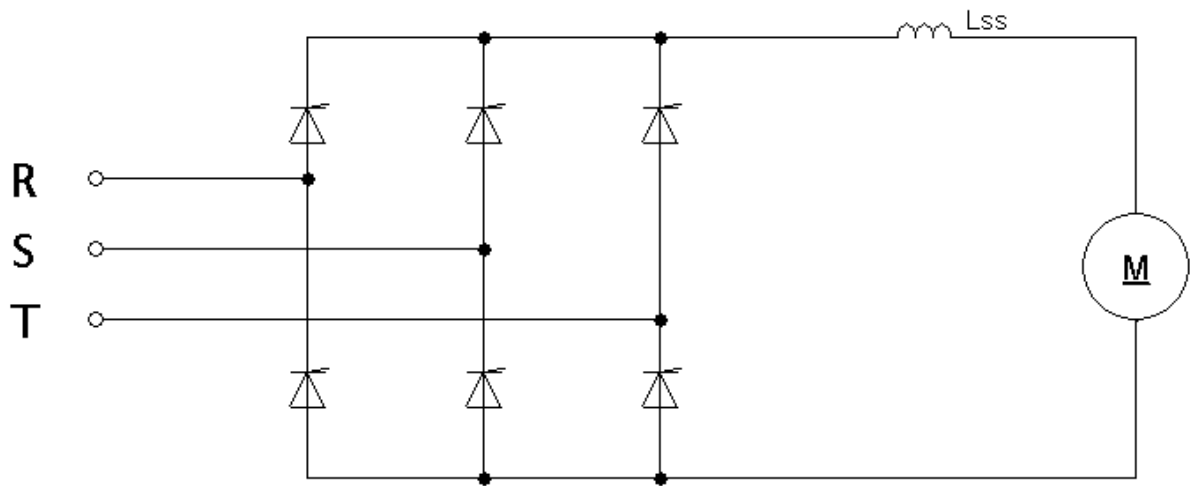
a obsah vyšších harmonických proudů

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I} \quad 1.6$$

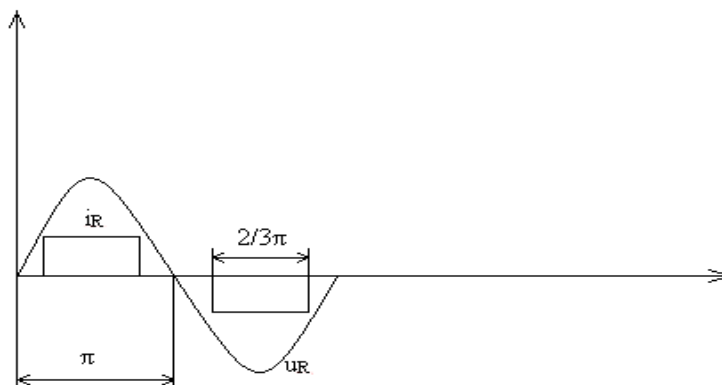
1.1 Usměrňovače

Při řešení usměrňovačů jako zdrojů vyšších harmonických proudů, které jsou odebírány ze sítě, zavádíme zjednodušující předpoklady [2]:

- Napájecí soustava je symetrická,
- na vstupu usměrňovače je napětí sinusové,
- indukčnost ve stejnosměrném obvodu $L_{SS} \rightarrow \infty$,
- zkratový výkon napájecí soustavy $S_{ks} \rightarrow \infty$, tj. vstupní indukčnost $L_{vs} \rightarrow 0$,
- zanedbáme ztráty usměrňovače.



Obr.4: Řízený můstkový usměrňovač



Obr.5: Idealizovaný proud odebíraný usměrňovačem

Provedením Fourierovy analýzy odebíraného proudu dostaneme:

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin\omega_1 t - \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t + \frac{1}{11} \sin 11\omega_1 t + \dots)$$

1.7

Rozborem předchozího vztahu přijdeme na to, že se zde vyskytují pouze vyšší harmonické určitých řádů h , a to :

$$h = ks \pm 1 \quad 1.8$$

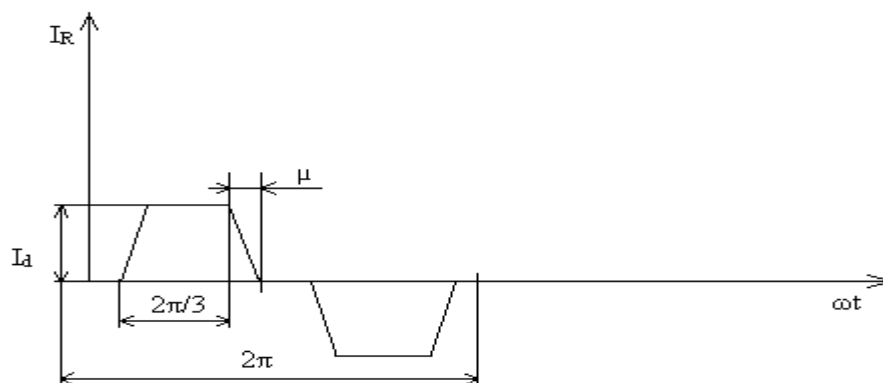
Harmonické, které splňují podmínky předchozí rovnice se nazývají charakteristické harmonické. Pro velikost vyšších harmonických lze psát vztah:

$$I_h = \frac{1}{h} * I_1 \quad 1.9$$

Tento vztah se označuje jako amplitudový zákon, ale platí i pro efektivní hodnoty vyšších harmonických [2].

Vliv úhlu komutace na vyšší harmonické proudy :

Vlivem indukčnosti v obvodu střídavého napětí (tj. zkratový výkon sítě $S_{ks} \neq \infty$) nemá proud odebíraný ze sítě obdélníkový průběh. Po dobu komutace, kdy jsou dva polovodiče připojené na různé fáze, současně vodivé, nastává přechod proudu z jednoho polovodiče na druhý. Elektrický úhel, během něhož komutace probíhá nazýváme úhlem komutace μ [2].



Obr.6: Průběh proudu s komutací měniče

Negativní účinek komutace způsobí zhoršení účinníku první harmonické.

Vliv zvlnění ve stejnosměrném obvodu na vyšší harmonické proudy :

Proud ve stejnosměrném obvodu ani proud odebíraný měničem není ideálně vyhlazený. Parametry reálného usměrňovače a skutečné zátěže potvrzují, že proud je nějak zvlněný. Výpočet vlivu zvlnění se musí řešit numericky [2].

Vliv nesymetrie na velikost vyšších harmonických proudů :

Tento jev nastává při rychlých dynamických změnách nebo při nesymetrii mezi zdroji řídicích impulsů. Velikost těchto proudů je relativně malá a je prakticky úměrná velikosti

nesymetrie řídicích impulsů. Tyto proudy jsou velmi rušivé. Obzvláště při použití filtrů může docházet ke vzniku rezonance na frekvenci některé necharakteristické harmonické [2].

Vliv úhlu řízení :

Regulací stejnosměrného napětí, změnou úhlu α , se posune i účinník základní harmonické. Se vzrůstajícím úhlem α (max. do $\pi/2$) však klesá úhel komutace μ . Od $\pi/2$ pak úhel komutace opět narůstá. Při větším α (do $\pi/2$) se proud více blíží obdélníkovému průběhu. Z toho plyne, že s růstem α (do $\pi/2$) se zvětšují velikosti vyšších harmonických proudů [2].

Současná práce více měničů :

U měničů lze předpokládat, že řídicí úhel nebude stejný, proto se jednotlivé vyšší harmonické proudy budou sčítat vektorově. Rozdíl úhlů řízení je $\Delta\alpha$. Pro efektivní hodnotu výsledné vyšší harmonické proudu musíme odvodit [2]:

- a) při současné práci dvou měničů se zapojením usměřňovačových transformátorů se vzájemným posuvem hodinových úhlů $\psi = 0^\circ$.

$$I_{\Sigma h} = \left| 2I_n \cos \frac{h\Delta\alpha}{2} \right| \quad \mathbf{1.10}$$

- b) při současné práci dvou měničů se zapojením usměřňovačových transformátorů s posuvem hodinových úhlů $\psi = 30^\circ$. Pro harmonické řádu $h = 6k \pm 1$, kde k je sudé číslo platí předchozí vztah. Pro harmonické kde k je liché číslo platí :

$$I_{\Sigma h} = \left| 2I_n \sin \frac{h\Delta\alpha}{2} \right| \quad \mathbf{1.11}$$

Z této rovnice vyplývá, že při stejném úhlu řízení se odstraní 5. a 7. harmonická. Toho se využívá ke snížení negativních účinků u měničů velkých výkonů [2].

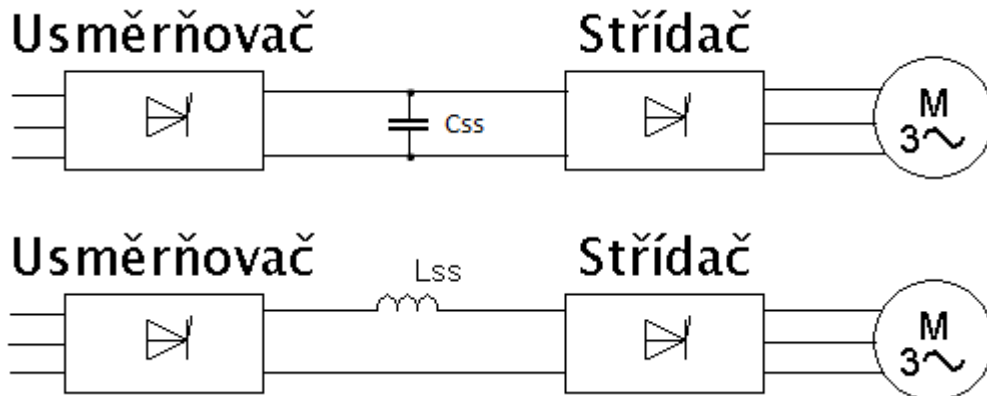
1.2 Měniče kmitočtu

Přímé měniče (cyklokonvertory) – dnes se již moc nevyužívají. U těchto měničů je přenos prováděn přímo na rozdíl od nepřímých měničů kmitočtu. Řízením je tvarováno výstupní napětí, že pro výstupní frekvenci platí: $0 < f_2 < f_1$. Velikosti jednotlivých harmonických vstupních proudů jsou závislé na provozních parametrech a nejsou ve všech fázích stejné. [2]

Nepřímé měniče – dělíme na dva typy.

- Měniče kmitočtu s napět'ovým střídačem
- Měniče kmitočtu s proudovým střídačem

U měničů s proudovým střídačem je ve stejnosměrném obvodu indukčnost a s napětovým střídačem je ve stejnosměrném obvodu kondenzátor.

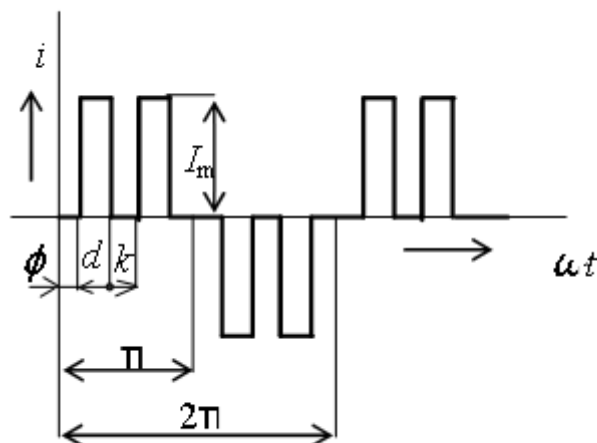


Obr.7: a,b měniče knitočtu

ad.a.) Ve stejnosměrném obvodu je proud vyhlazován tlumivkou L_{SS} . Pokud tato indukčnost bude dostatečně velká, bude proud ve stejnosměrném meziobvodu dostatečně vyhlazený abychom mohli určit řád harmonických proudů a výpočet jejich velikosti jako u řízených usměrňovačů [2].

Zjednodušené podmínky :

- Symetrická napájecí soustava
- Harmonické napájecí napětí
- Ztráty usměrňovače zanedbáme
- Zjednodušený průběh odebíraného proudu



Obr.8: Průběh odebíraného proudu

Na průběh proudu odebíraného z napájecí sítě, tj. na jeho harmonické spektrum, má dominantní vliv vstupní usměrňovač společně se stejnosměrným meziobvodem, kdežto vliv střídače je v tomto kmitočtovém spektru nízký [3].

Harmonická analýza proudu

Definování proudu na polovině periody :

$$i(\omega t) = 0 \text{ pro : } \omega t \in (0, \phi), \omega t \in (\phi + d, \phi + d, \phi + d + k), \omega t \in (\phi + 2 * d + k, \phi + d, \pi),$$

$$i(\omega t) = I_m \text{ pro : } \omega t \in (\phi, \phi + d), \omega t \in (\phi + d + k, \phi + 2 * d + k)$$

- Funkce je lichá -> ve Fourierově řadě budou pouze sinusové funkce, stačí spočítat pouze koeficienty b_h

$$\begin{aligned} b_h &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i(\omega t) * \sin(h\omega t) * d\omega t \\ b_h &= \frac{2}{\pi} * I_m * \left(\int_\phi^{\phi+d} \sin(h\omega t) d\omega t + \int_{\phi+d+k}^{\phi+2d+k} \sin(h\omega t) d\omega t \right) \\ &= -\frac{2 * I_m}{\pi * h} * \cos[h\omega t]_\phi^{\phi+d} - \frac{2 * I_m}{\pi * h} * \cos[h\omega t]_{\phi+d+k}^{\phi+2d+k} \end{aligned}$$

Ve vztahu v mezích nahradíme úhel ϕ :

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\pi - 2d - k}{2} = \frac{\pi}{2} - d - \frac{k}{2} \\ b_h &= -\frac{2 * I_m}{\pi * h} * \cos[h\omega t]_{\frac{\pi}{2}-d-\frac{k}{2}}^{\frac{\pi}{2}-\frac{k}{2}} - \frac{2 * I_m}{\pi * h} * \cos[h\omega t]_{\frac{\pi}{2}+d+\frac{k}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{k}{2}} \end{aligned}$$

Po matematické úpravě a dosazení za $k = \frac{\pi}{3} - d$ (úhel $d + k$ je roven $\pi/3$, což odpovídá jednomu taktu v trojfázovém můstku při symetrickém napájení) dostaneme pro b_h (velikost amplitudy proudu h-té harmonické) [1]:

$$b_h = \frac{8}{h * \pi} * I_m * \sin \frac{h * d}{2} * \cos \frac{h * \pi}{6} * \sin \frac{h * \pi}{2} * \sin(h\omega t)$$

V odebíraném proudu jsou pouze tyto harmonické:

$$h = k * s \mp 1$$

Velikost jednotlivých harmonických:

$$I_h = \frac{1}{h} * I_1 * \frac{\sin \frac{h*d}{2}}{\sin \frac{d}{2}}$$

1.13

Je to tzv. amplitudový zákon , který platí při výše uvedených podmínkách.

Jelikož výstupní frekvence f_2 bývá odlišná od vstupní frekvence f_1 , objeví se ve stejnosměrném meziobvodu harmonické proudy s frekvencí [3] :

$$f_{ih2} = hp_2 f_2 \quad 1.14$$

Naopak, složky proudu způsobené napájecí stranou :

$$f_{ih1} = hp_1 f_1 \quad 1.15$$

Dochází k vzájemnému přenosu harmonický z jedné strany na druhou přes stejnosměrný meziobvod. Na napájecí straně jsou frekvence proudu [3] :

$$f_h = f_1 (ks_+^+ 1)_-^+ f_2 h s_2 \quad 1.16$$

Bude-li v meziobvodu pouze stejnosměrný proud, má síťový proud jen charakteristické harmonické. Pokud ne, bude síťový proud obsahovat i meziharmonické kmitočty. Největší amplitudu budou mít frekvence [3]:

$$f_{h \max} = f_{1-}^+ s_2 f_2 \quad 1.17$$

Zvlnění proudu v meziobvodu je velice nízké, díky tomu jsou nízké i hodnoty meziharmonických i harmonických proudů [3].

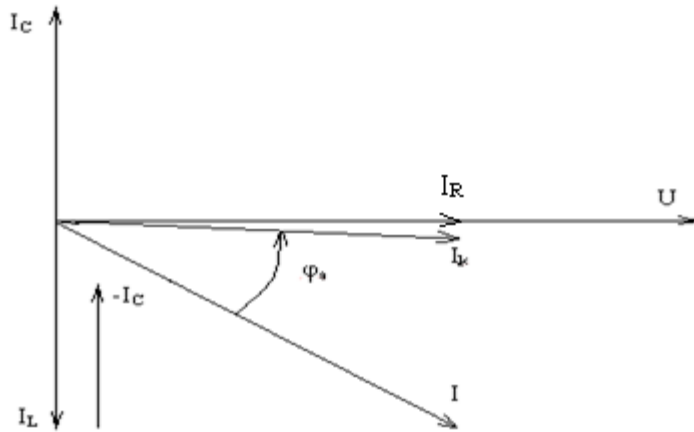
Velikost amplitudy harmonických proudů v meziobvodu určíme:

$$I_h = \frac{U_h}{2\pi f_h L_{ss}} \quad 1.18$$

U_h je harmonická střídavé složky a L_{ss} je velikost indukčnosti [3].

2. Problematika účinníku v obvodech s nelineárními spotřebiči

Důležitá informace je že nelze oddělit filtraci od kompenzace. Princip kompenzace spočívá v tom že prvky připojené do sítě nemají pouze činnou složku ale i jalovou (která má buď kapacitní nebo induktivní charakter). Jalovou složku nelze nijak zužitkovat, ale je třeba ji vyrobit a přenést ke spotřebiči. Tím vznikají ztráty na vedení (přeměna na teplo) , proto je vhodné tuto jalovou složku eliminovat pomocí vloženého zařízení. Většina připojených impedancí má induktivní charakter, proto se její kompenzace provádí kapacitní složkou. Nejčastěji používaným kompenzátozem je kondenzátor. [3]



Obr.9: Kompenzace účinníku kondenzátorem

Z obrázku je patrný princip kompenzace účinníku. Spotřebič odebírá proud I který je fázově posunut o φ_A , tento úhel se snažíme zmenšit na minimum. Norma udává účinník 0,95-1 induktivního charakteru. Pro splnění tohoto požadavku musíme připojit C. Ale nesmíme ho překompenzovat.[3]

$$I_C \leq I_L \quad 2.1$$

Problémy kompenzace [3]:

- Časová proměnnost odebraného výkonu a účinníku (dynamika potřebného jalového výkonu).
- Problematika spínání kondenzátoru (velké spínací proudy).
- Prostor a místo umístění kondenzátoru.

Pro činný výkon platí:

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h \quad \text{kde} \quad \varphi_h = \varphi_{U,h} - \varphi_{I,h} \quad 2.2$$

tedy

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} P_h = P_1 + P_2 + \dots$$

Z předchozí rovnice vidíme, že střední hodnota výkonu obecně střídavého proudu se rovná součtu středních hodnot výkonů jednotlivých harmonických. To zároveň znamená, že napětí a proud dvou různých kmitočtů nedávají trvale žádný výkon.

Střední hodnota jalového výkonu je definována analogicky jako součet středních hodnot jalových výkonů jednotlivých harmonických [1].

$$Q = \sum_{h=0}^{\infty} Q_h = \sum_{h=0}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h \quad 2.3$$

Střední hodnota zdánlivého výkonu je definována jako součin efektivních hodnot proudu a napětí

$$S = U * I = \sqrt{\sum_{h=0}^q I_h^2 \sum_{h=0}^q U_h^2} \quad 2.4$$

a poměr činného a zdánlivého výkonu

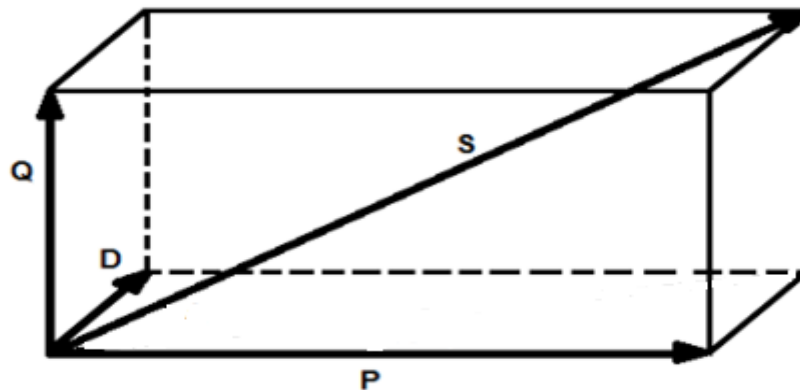
$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=0}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{h=0}^q I_h^2 \sum_{h=0}^q U_h^2}} \quad 2.5$$

označujeme jako činitel výkonu.

Pro zdánlivý výkon také platí :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad 2.6$$

kde D je tzv. deformační výkon, který je produktem efektivních hodnot harmonických různého řádu včetně jejich součinů se stejnosměrnými složkami napětí a proudu. Deformační výkon způsobuje, že není-li mezi harmonickými proudy a napětí fázový posuv, je přesto činitel výkonu $\lambda < 1$ [3].



Obr.10: Výkony v obvodu s neharmonickými proudy a napětím

2.1 Úmístění kompenzačního zařízení

- Individuální – kompenzační zařízení je připojeno na svorkách spotřebiče.
- Skupinová – kompenzační zařízení slouží pro skupinu spotřebičů a je připojeno na přípojnicích rozvaděče.
- Centrální – Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnice vstupního transformátoru.
- Kombinovaná – kombinace předchozích.

2.2 Možnosti kompenzace účinníku

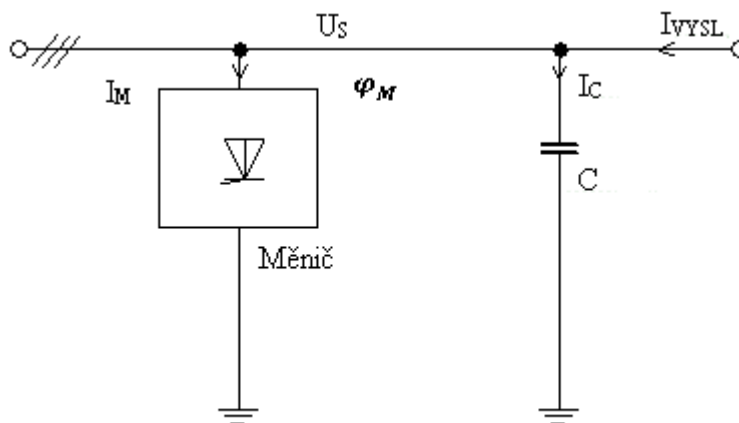
- Prosté kondenzátory
- Chráněná kompenzace
- Rotační kompenzátory

2.2.1 Kompenzace účinníku pomocí kondenzátorů

Hlavním úkolem kondenzátorů je kompenzace jalového výkonu, a to buď v místě připojení měniče, nebo v místě umístění skupinové, či centrální kompenzace. Z hlediska přizpůsobení se rychlým změnám zatížení, je kondenzátor prvkem neproměnným, i když kondenzátorová baterie může být vybavena přepínáním počtu stupňů. Pro výkon kondenzátoru platí vztah [2] :

$$Q_C = S_M * \cos\varphi (tg\varphi - tg\varphi_C)$$

2.7

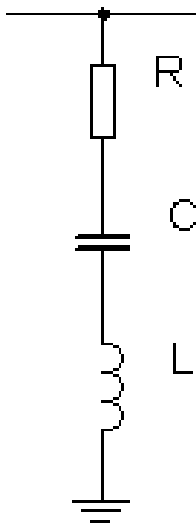


Obr.11: Prostá kompenzace

Od kompenzačního kondenzátoru požadujeme [5] :

- Tepelnou stabilitu při vysokém jalovém výkonu.
- Odolnost proti přepětí.
- Spolehlivost a bezpečnost provozu.

2.2.2 Chráněná kompenzace



Obr.12: Chráněná kompenzace

Filtry jsou v současné době nejlepším řešením, kromě kompenzačních účinků je patrný i účinek pro minimalizaci vyšších harmonických. Protože bývá zatížení od měničů proměnné, lze použít kombinaci filtrů a některý ze způsobů rychlé kompenzace jalového výkonu. Filtry poté kryjí potřebu filtrace určitého jalového výkonu a kompenzátor pak kryje proměnlivý indukční výkon [2].

Rezonanční filtr je sériový L-C obvod, který představuje pro vyšší harmonickou, na kterou je naladěný, nulový odpor. Pak pro všechny ostatní frekvence L-C obvod představuje kapacitní nebo induktivní reaktanci. Filtry se využívají ke snížení napětí a proudů vyšších harmonických ve střídavé napájecí síti na určitou velikost, a také k dodávání celého nebo alespoň části jalového výkonu, který spotřebovává měnič [2].

Filtr se pro nižší frekvence než rezonanční frekvence chová jako kapacita a pro vyšší frekvence jako indukčnost [2]. Pro rezonanční kmitočet můžeme napsat [7] :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad \mathbf{2.8}$$

Pro volbu vhodného kompenzačního článku se v praxi využívá tzv. Činitel ztlumení p :

$$p = \frac{1}{h_r^2} * 100 \text{ [%]} \quad \mathbf{2.9}$$

Pro koeficient n_r můžeme napsat :

$$h_r = \frac{f_r}{f_n} \text{ [-]} \quad \mathbf{2.10}$$

f_r – rezonanční kmitočet

f_n – pracovní frekvence site

Pro výpočet reaktance kondenzátoru vycházíme z Ohmova zákona :

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} [\Omega] \quad 2.11$$

Q_C – kompenzační výkon

U_{CN} – katalogová hodnota jmenovitého sdruženého napětí

Reaktanci cívky vypočteme pomocí činitele zatlumení :

$$X_L = -pX_C [\Omega] \quad 2.12$$

Pro celkovou reaktanci kompenzačního článku můžeme napsat :

$$X_{LC} = (1 - p)X_C [\Omega] \quad 2.13$$

Vlivem připojené tlumivky je napětí na kondenzátoru vyšší než je napětí síťové :

$$U_C = \frac{U_{CN}}{1-p} [\text{V}] \quad 2.14$$

Kompenzační výkon se počítá ze jmenovitého napětí, které již uvažuje činitele zatlumení, ale kondenzátor se provozuje na nižším napětí, tím pádem klesá jeho kompenzační výkon, což vyplývá z upraveného vztahu (2.11) na vztah :

$$Q_C = \frac{U_{SN}^2}{X_C} \quad 2.15$$

2.2.3 Rotační kompenzátory

Jako rotační kompenzátory se používají synchronní kompenzátory a synchronní motory. Velikost kompenzace se řídí budícím vinutím, napájeným ze zdroje stejnosměrného proudu. Bývají konstruovány pro hladinu vysokého napětí.[7]

2.3 Minimalizace harmonických

Úplně harmonické proudy odstranit nelze. Nejprve musíme zjistit, zda zkreslení je nadměrné a je třeba ho minimalizovat. Máme několik možností pro minimalizaci harmonického proudu [7] :

- Bez pomoci přídavných zařízení
- Pomocí dodatečných prostředků

2.3.1. Bez pomoci přídavných zařízení

- a) Navýšení počtu fází
- b) Sériové a paralelní spojení usměrňovačů
- c) Pulzní usměrňovače

Ad a) Je to velmi častý způsob minimalizace harmonických, můžeme použít speciální transformátor, který umožňuje vícefázový chod měniče. Nebo použít skupinu měničů, kde jednotlivé měniče mají menší počet fází, ale na venek se jeví jako vícefázové.[3]

Ad b) Tento způsob vede ke snížení harmonických proudů, ale i ke zlepšení účinníku první harmonické.[3]

2.3.2. Pomocí dodatečných prostředků

Jelikož nemůžeme filtraci řešit od kompenzace (filtr je zároveň kompenzátorem). Při výběru vhodného zařízení musíme brát v úvahu [3] :

- možnost potlačení harmonických
- schopnost symetrizace při nesouměrném zatížení sítě
- rychlost zapůsobení kompenzačního zařízení
- průběh proudu odebíraného FKZ
- ztráty energie
- výkon a váha FKZ, vztažené k výkonu zdroje rušení
- investiční náklady a ekonomická efektivnost instalace FKZ

Principy dodatečných zařízení [3] :

- kompenzace a filtrace pomocí chráněné kompenzace
- použití synchronních kompenzátorů
- aktivní filtry

3. Návrh řešení kompenzace

Zadané hodnoty :

U_s	400 [V]
f_n	50 [Hz]
f_r	189 [Hz]
P_i	500 [kW]
P_{max}	250 [kW]
$\cos\varphi$	0,8
$\cos\varphi_c$	0,98
η	0,8
P_1	50 [kW]
P_2	50 [kW]
P_3	50 [kW]
P_4	150 [kW]
P_5	200 [kW]

Obr.13: Zadané hodnoty

Obecným pravidlem je, že nechráněnou kompenzaci použijeme v závodech, kde instalovaný výkon nelineární zátěže nepřesáhne 11-15 %. Dále je nutné připomenout, že pro správný návrh chráněné kompenzace je zapotřebí analýza sítě pro zjištění vyšších harmonických, které se v dané síti nejvíce vyskytují. Základním parametrem, ze kterého budeme vycházet je činitel zatlumení p . Činitel zatlumení musí brát ohled na signál HDO, v ČR se používají frekvence 183.33 Hz, 216.66 Hz, 283.33 Hz, 760 Hz a 1060 Hz. Pro můj návrh sem si zvolil hodnotu 216.66 Hz, a proto rezonanční frekvence musí být zvolena s dostatečným odstupem. V praxi se využívá rezonanční frekvence $f_r = 189 \text{ Hz}$ tuto hodnotu dosadíme do vzorců (2.9),(2.10) [6] :

$$h_r = \frac{f_r}{f_n} = \frac{189}{50} = 3,78$$

f_n – pracovní frekvence sítě

$$p = \frac{1}{h_r^2} * 100 = \frac{1}{3,78^2} * 100 = 7 \%$$

Takže činitel zatlumení nám vyšel 7 % , s tímto činitelem budeme celou kompenzací navrhovat. Dále musíme vypočítat součinitel soudobosti :

$$\beta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{250 * 10^3}{500 * 10^3} = 0,5$$

3.1

P_i – celkový instalovaný výkon v našem případě 500 kW

P_{max} – je příkon určený z maximálního odběru elektrické energie za hodinu v období největšího odběru v roce v našem případě 250 kW

Poté musíme spočítat výpočtové zatížení P_p :

$$P_p = \beta * P_i = 0,5 * 500 * 10^3 = 250 \text{ kW} \quad 3.2$$

Výkon kondenzátoru bude podle rovnice (2.7) na požadovaný účinník $\cos\varphi_c = 0,98$. Současný účinník je $\cos\varphi = 0,8$, který sem spočítal z celkového jalového a činného výkonu, toto je ale účinník teoretický. Tento účinník by platil pouze v případě, že všechny zátěže běží na plný výkon. Z toho vyplývá, že účinník mírně klesá, když pohon neběží na plný výkon, proto budeme počítat z trochu menším účinníkem ($\cos\varphi = 0,78$). [6]

$$Q_{Ccelkový} = P_p (tg\varphi_c - tg\varphi) = 250 * 10^3 (0,2 - 0,8) = 150 \text{ kVAr}$$

V praxi se doporučuje z důvodu jisté rezervy navýšit výkon kondenzátoru o 5-10%. Výsledná hodnota nechráněné kompenzace bude $Q_{Ccelkový} = 164 \text{ kVAr}$. Tato hodnota platí pouze u nechráněné kompenzace, protože u chráněné kompenzace se ke kondenzátoru přidává tlumivka, a tato tlumivka snižuje kompenzační výkon. Dále musíme určit jednotlivé stupně kompenzace. V praxi se určí první stupeň z nejmenšího pohonu a další stupně jsou pouze celé násobky kondenzátoru. V našem případě je to pohon o jmenovitém příkonu 50 kW musíme spočítat výkon motoru [6]:

$$P_p = \eta P = 0,8 * 50 * 10^3 = 40 \text{ kW}$$

Tuto hodnotu dosadíme do rovnice (2.7) a vyjde nám hodnota

$$Q_{C1stupeň} = 24 \text{ kVAr} .$$

3.1 Chráněná kompenzace

Z důvodu předřazené tlumivky je na kondenzátoru vyšší napětí než je napětí síťové, toto napětí spočítáme podle vztahu :

$$U_{C1stupeň} = \frac{U_S}{1-p} = \frac{400}{1-0,07} = 430 \text{ V}$$

Nyní si spočteme proud, který prochází kondenzátorem :

$$I_{C1stupeň} = \frac{Q_{C1stupeň}}{\sqrt{3}U_{SN}} = \frac{24*10^3}{\sqrt{3}*400} = 34,6 \text{ A}$$

Pomocí Ohmova zákona určíme kapacitu kondenzátoru v jedné fázi :

$$C_{1stupeň} = \frac{I_{C1stupeň}}{\frac{U_{C1stupeň}}{\sqrt{3}} * 3 * \omega} = \frac{34,6}{\frac{430}{\sqrt{3}} * 3 * 2\pi * 50} = 147,8 \text{ } \mu\text{F}$$

Jmenovité napětí 440 V, frekvence 50 Hz						
Typ	Q_c [kvar]	C_N [μF]	I_N [A]	I_{max} [A]	Rozměry $d_f \times h$ [mm]	Hmotnost [kg]
FORTISMKP G 0,6 kvar/ 440 V	0,6	3×3,3	3×0,79	3×1,12	65×175	0,54
FORTISMKP G 1,3 kvar/ 440 V	1,3	3×7,1	3×1,7	3×2,41	65×175	0,59
FORTISMKP G 2,0 kvar/ 440 V	2	3×11	3×2,63	3×3,74	65×175	0,51
FORTISMKP G 2,5 kvar/ 440 V	2,5	3×13,7	3×3,28	3×4,66	65×175	0,55
FORTISMKP G 3,0 kvar/ 440 V	3	3×16,4	3×3,93	3×5,58	65×175	0,5
FORTISMKP G 4,0 kvar/ 440 V	4	3×21,9	3×5,24	3×7,45	65×175	0,58
FORTISMKP G 5,0 kvar/ 440 V	5	3×27,4	3×6,56	3×9,32	65×175	0,66
FORTISMKP G 6,25 kvar/ 440 V	6,25	3×33,3	3×7,97	3×11,32	65×240	0,69
FORTISMKP G 7,5 kvar/ 440 V	7,5	3×41,1	3×9,84	3×13,97	65×240	0,77
FORTISMKP G 9,0 kvar/ 440 V	9	3×49,3	3×11,8	3×16,76	76×240	0,9
FORTISMKP G 10,0 kvar/ 440 V	10	3×54,8	3×13,12	3×18,63	76×240	0,92
FORTISMKP G 12,5 kvar/ 440 V	12,5	3×68,5	3×16,4	3×23,29	76×240	1,14
FORTISMKP G 15,0 kvar/ 440 V	15	3×82,2	3×19,68	3×27,95	86×240	1,26
FORTISMKP G 18,2 kvar/ 440 V	18,2	3×99,8	3×23,89	3×33,93	96×240	1,55
FORTISMKP G 20,0 kvar/ 440 V	20	3×109,7	3×26,26	3×37,3	96×240	1,61
FORTISMKP G 25,0 kvar/ 440 V	25	3×133	3×31,84	3×45,22	106×240	1,9
FORTISMKP G 30,0 kvar/ 440 V	30	3×166	3×39,74	3×56,44	116×240	2,26
FORTISMKP G 36,3 kvar/ 440 V	36,3	3×199	3×47,64	3×67,66	116×285	2,6

Obr.14: Katalog kompenzačních kondenzátorů od firmy KBH energy

Z katalogu jsme si vybrali nejbližší vyšší hodnoty od spočítaných hodnot. Jako nejvhodnější kondenzátor se mi jevil FORTISMKP G 30 kvar / 440 V s hodnotami $Q_{C \text{ 1stupeň}} = 30 \text{ kVAr}$, $C_{N \text{ 1stupeň}} = 3 \times 166 \text{ μF}$. Nyní si musíme spočítat, jestli kondenzátor vyhovuje k určité tlumivce. Na to přijdeme z reaktance :

$$X_{C \text{ 1stupeň}} = \frac{1}{\omega C \text{ 1stupeň}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 166 \cdot 10^{-6}} = 6,39 \text{ Ω}$$

Nyní ze vztahu (2.13) vypočteme celkovou reaktanci kompenzátoru :

$$X_{LC \text{ 1stupeň}} = (1 - p)X_{C \text{ 1stupeň}} = (1 - 0,07) \cdot 6,39 = 5,94 \text{ Ω}$$

Pomocí vztahu (2.15) vypočteme skutečný výkon kompenzátoru :

$$Q_{LC \text{ 1stupeň}} = \frac{U_{SN}^2}{X_{LC \text{ 1stupeň}}} = \frac{400^2}{5,94} = 26,9 \text{ kVAr}$$

Výsledný výkon kompenzace je skoro rovný výkonu samotného kondenzátoru, proto se k sobě hodí s danou tlumivkou. Nyní si spočteme reaktanci cívky podle vzorce (2.12) :

$$X_{L \text{ 1stupeň}} = -pX_{C \text{ 1stupeň}} = 0,07 \cdot 6,39 = 0,45 \text{ Ω}$$

Pomocí reaktance si spočítáme indukčnost tlumivky :

$$L_{1stupeň} = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,45}{2\pi \cdot 50} = 1,43 \text{ mH}$$

Jmenovité napětí 400 V, 50 Hz, kondenzátory 440 V, činitel zatlumení 7 %						
Typ	Q _c (kvar)	C _N (μF)	Q _{DL} (kvar)	L _N (mH)	Proud I _N (A)	Proud I _{LIN} (A)
VINDEX 5/440-7-4/400	5	3 × 28	4,4	8,63	6,4	8,3
VINDEX 7,5/440-7-7/400	7,5	3 × 40	6,7	5,75	9,6	12,5
VINDEX 10/440-7-9/400	10	3 × 57	8,9	4,31	12,8	16,7
VINDEX 12,5/440-7-11/400	12,5	3 × 68	11,1	3,45	16	20,8
VINDEX 14/440-7-12,4/400	14	3 × 77	12,4	3,17	17,5	22,8
VINDEX 15/440-7-13/400	15	3 × 82	13,3	2,88	19,2	25
VINDEX 20/440-7-18/400	20	3 × 111	17,9	2,15	25,6	33,3
VINDEX 25/440-7-22/400	25	3 × 137	22,2	1,73	31,9	41,7
VINDEX 28,1-7-25/400	28,1	3 × 154	25	1,53	32,9	42,2
VINDEX 30/440-7-26/400	30	3 × 166	26	1,46	37,8	50
VINDEX 40/440-7-36/400	40	3 × 219	36	1,07	51,3	66,7
VINDEX 50/440-7-44/400	50	3 × 274	44	0,86	63,9	83,4
VINDEX 56,2-7-50/400	56,2	3 × 306	50	0,77	64,9	84,4

Obr.15: Katalog ochranných tlumivek od firmy KBH energy

Ostatní hodnoty kompenzačních stupňů jsem zvolil takto :

stupeň	Q _C [kVAr]	Q _{LC} [kVAr]	C [μF]	L [mH]
1	30	26	3x166	1,46
2	30	26	3x166	1,46
3	30	26	3x166	1,46
4	40	36	3x219	1,07
5	56,2	50	3x306	0,77

Obr.16: Kompenzační stupně chráněné kompenzace

Jak je vidět z tabulky celkový kompenzační výkon chráněné kompenzace je 164 kVAr, to je výkon který jsme potřebovali, ale celkový výkon kondenzátorů je 186,2 kVAr to je způsobeno tím, že ochranná tlumivka snižuje kompenzační výkon.

3.2 Nechráněná kompenzace

Spočteme proud, který prochází kondenzátorem :

$$I_{C \text{ 1stupeň}} = \frac{Q_{C \text{ 1stupeň}}}{\sqrt{3}U_{SN}} = \frac{24 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 34,6 \text{ A}$$

Pomocí Ohmova zákona určíme kapacitu kondenzátoru v jedné fázi :

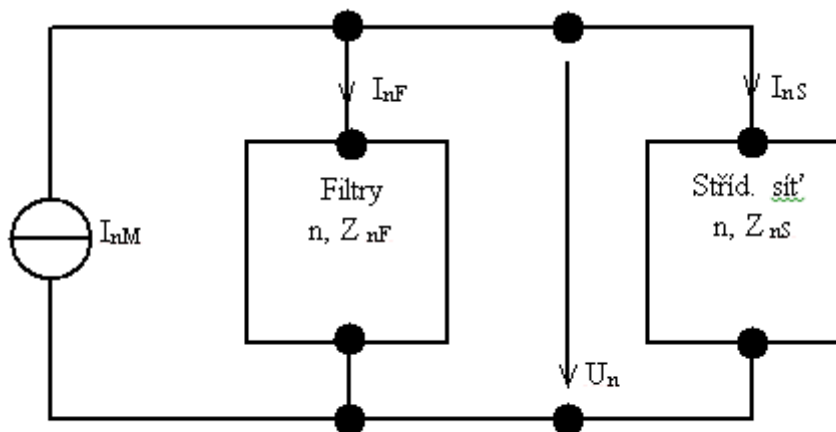
$$C_{1stupeň} = \frac{I_{C \text{ 1stupeň}}}{\frac{U_{C \text{ 1stupeň}}}{\sqrt{3}} \cdot 3 \cdot \omega} = \frac{34,6}{\frac{400}{\sqrt{3}} \cdot 3 \cdot 2\pi \cdot 50} = 158,9 \text{ μF}$$

Kapacita nám vyšla podobná jako u chráněné kompenzace proto zvolíme stejnou hodnotu kondenzátoru pro první stupeň jako u ní viz. obr.13.

stupeň	Qc [kVAr]	C [uF]
1	30	3x166
2	30	3x166
3	30	3x166
4	30	3x166
5	40	3x219

Obr.17: Kompenzační stupně klasické kompenzace

4. Filtr jako prvek sítě



Obr.18: Rozdělení proudů

Na obrázku je měnič prezentován jako zdroj proudu. Proud se dělí podle Kirchhochoffa zákona mezi filtr a síť. V nejhorším případě se dostane filtr a síť do paralelní rezonance, což by vedlo k velkým proudům I_{nF} a I_{nS} . Tato rezonance je velmi nepříznivý jev, a je třeba jí předcházet. Na charakteristických frekvencích je to jev nepravděpodobný, ale na vyšších frekvencích se může vyskytovat. Z tohoto důvodu se zkoumá impedance a vlastnosti sítě [2].

Otázkou je na jakou frekvenci filtr naladit. Záleží co od filtru očekáváme, jestli očekáváme především filtrační účinek, tak filtr musí být navržen s tzv. minimálním kompenzačním účinkem nebo stupněm ztlumení (chráněná kompenzace) [1]. Orientační výpočet se provádí z vlastností napájecí soustavy, hlavního transformátoru ($L_S + L_T$) a hodnot filtru, či chráněné kompenzace ($L_F C_F$).

$$h = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{(L_S + L_T + L_F) C_F}} \quad 4.1$$

Volba frekvence závisí na harmonické frekvenci, kterou chceme ztlumit. Druhý problém je jak filtr naladit v praxi. To závisí na proudu, který může procházet filtrem. Tento proud se zjišťuje buď výpočtem nebo měřením. V sítích se obvykle vyskytuje více zdrojů, proto se filtr většinou podladuje, aby nedocházelo k přetěžování filtru. Při podladění má filtr nižší

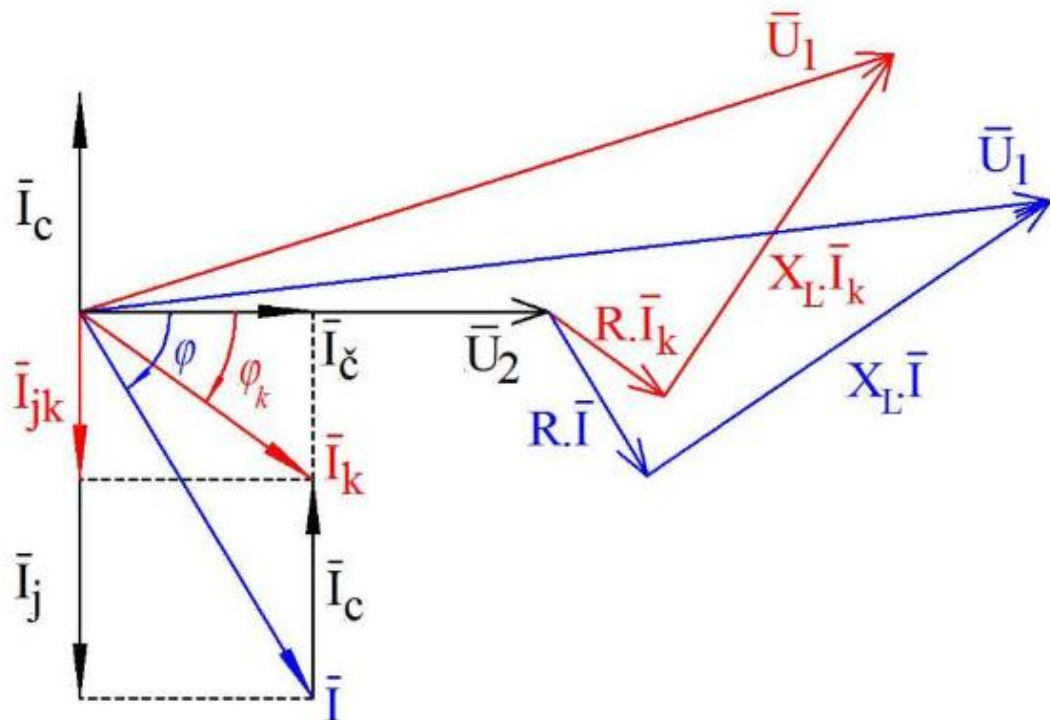
frekvenci než je charakteristická frekvence a z tohoto důvodu má induktivní charakter k přeladění filtru. Kdyby došlo k přeladění filtru hrozí nebezpečí vzniku již zmíněné nežádoucí paralelní rezonance. A to by vedlo ke vzniku vysokých hodnot harmonických napětí [1].

4.1 Vliv FKZ na napětí sítě

Filtry ještě způsobují úbytek napětí v síti, a to na základní harmonickou a i na h-té harmonické. Jak už sem zmiňoval filtrace nejde oddělit od kompenzace, proto se teď budeme zabývat statickými účinky filtrů. [3]

4.1.1 Kompenzační účinek filtrů

Vliv filtru na napájecí síť je vysvětlen na následujícím obrázku. [3]



Obr.19: Fázorový diagram napětí a proudů sítě před (modře) a po (červeně) kompenzaci

Činitel kompenzace ρ_k jak se změní úbytek napětí po připojení filtrů.

$$\rho_k = \sqrt{\frac{I_{c1F}^2 + I_{j1F}^2}{I_{c1}^2 + I_{j1}^2}} = \frac{I_{1F}}{I_1} = \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_{1F}}$$

4.2

Indexy:

c – činná složka

j – jalová složka

I – první harmonická
 F – stav po instalaci filtru

V našem případě :

$$\rho_k = \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_{1F}} = \frac{0,78}{0,98} = 0,8$$

4.1.2 Filtrační účinek filtrů

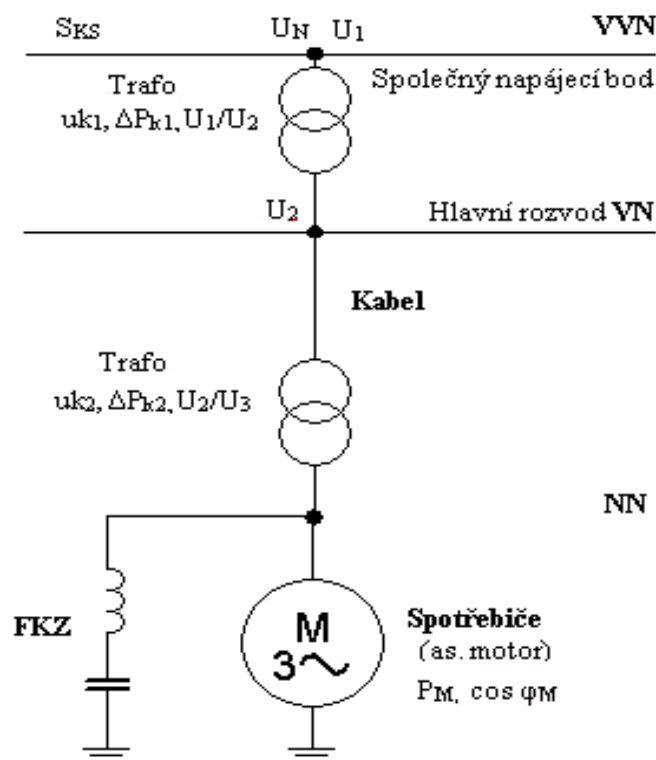
Zavádíme činitel filtrace ρ_F , který udává kvalitu filtrace. [3]

$$\rho_F = \frac{U_{hF}}{U_h} = \frac{Z_{SF}}{Z_S}$$

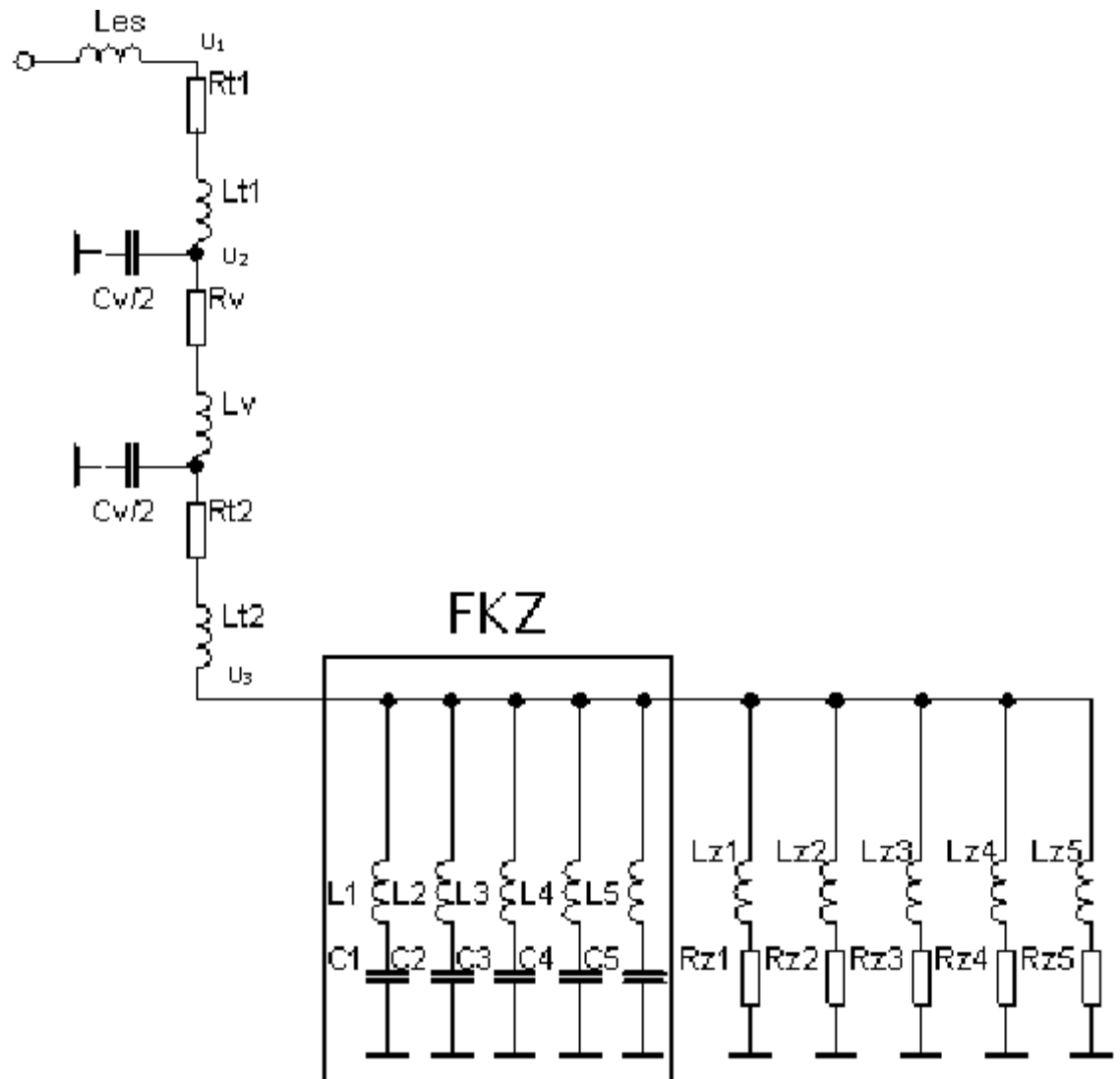
4.3

Filtrační účinek chráněné kompenzace budeme počítat pro 3 a 5 harmonickou, ze vzorců vychází, že musíme určit impedanci sítě a impedanci filtru. Pro výpočet impedance sítě neuvažujeme jenom o prvcích sítě ale i zátěže. Takže celková impedance sítě se skládá [10] :

- Napájecí síť
- Vedení
- Transformátoru
- Zátěže
- FKZ



Obr.20: Zapojení sítě



Obr.21: Náhradní schéma sítě

Ad a)

Impedance sítě se modeluje jako indukčnost, pomocí zkratového výkonu v příslušném místě [3].

Zadané hodnoty :

$UN = U1$	22 [kV]
Sk	1500 [MW]

Obr.22: Zadané hodnoty pro napájecí sítě

$$Z_{es} = \frac{1,1 \cdot U_N^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 484}{1500} = 0,35 \, \Omega$$

4.4

Ad b)

Impedance vedení se počítá pomocí π článku, v našem případě je vedení krátké, tak kapacitu vedení zanedbáme. A budeme uvažovat vedení jako RL obvod [3].

Zadané hodnoty :

l	0,5	[km]
X	0,36	[Ω /km]
R	0,15	[Ω /km]

Obr.23: Zadané hodnoty pro vedení

$$X_{\text{vedení}} = l * X * h_r = 0,5 * 0,36 * 3,78 = 0,18 \Omega \quad 4.5$$

$$R_{\text{vedení}} = R * l = 0,15 * 0,5 = 0,075 \Omega \quad 4.6$$

$$Z_{\text{vedení}} = \sqrt{X_{\text{vedení}}^2 + R_{\text{vedení}}^2} = \sqrt{0,18^2 + 0,075^2} = 0,195 \Omega \quad 4.7$$

Impedance vedení pro třetí harmonickou:

$$Z_{\text{vedení},3h} = \sqrt{3X_{\text{vedení}}^2 + R_{\text{vedení}}^2} = \sqrt{0,54^2 + 0,075^2} = 0,545 \Omega \quad 4.8$$

Impedance vedení pro pátou harmonickou:

$$Z_{\text{vedení},5h} = \sqrt{5X_{\text{vedení}}^2 + R_{\text{vedení}}^2} = \sqrt{0,9^2 + 0,075^2} = 0,903 \Omega \quad 4.9$$

l – délka vedení

Ad c)

Parametry transformátorů :

$Un1$	22/6	[kV]	$Un2$	6/0,4	[kV]
$Sn1$	80	[MVA]	$Sn2$	9	[MVA]
ΔP_{k1}	0,9	[MW]	ΔP_{k2}	0,01	[MW]
U_{k1}	6	[%]	U_{k2}	9	[%]

Obr.24: Zadané hodnoty pro transformátory

$$Z_{t1} = \frac{U_{k1}}{100} * \frac{U_{n1}^2}{S_{n1}} = \frac{6}{100} * \frac{22000^2}{80 * 10^6} = 0,364 \Omega \quad 4.10$$

$$R_{t1} = \Delta P_{k1} * \frac{U_{n1}^2}{S_{n1}^2} = 0,9 * 10^6 * \frac{22000^2}{80 * 10^6^2} = 0,068 \Omega \quad 4.11$$

$$X_{t1} = \sqrt{Z_{t1}^2 - R_{t1}^2} = \sqrt{0,364^2 - 0,068^2} = 0,357 \Omega \quad 4.10$$

U_k – napětí transformátoru na krátko

U_n – jmenovité napětí transformátoru

S_n – jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

ΔP_k – činné ztráty transformátoru v zapojení na krátko

Impedance prvního transformátoru pro třetí harmonickou:

$$Z_{t1,3h} = \sqrt{3X_{t1}^2 + R_{t1}^2} = \sqrt{1,071^2 + 0,068^2} = 1,073 \Omega \quad 4.11$$

Impedance prvního transformátoru pro pátou harmonickou:

$$Z_{t1,5h} = \sqrt{5X_{t1}^2 + R_{t1}^2} = \sqrt{1,785^2 + 0,068^2} = 1,78 \Omega \quad 4.12$$

$$Z_{t2} = \frac{U_{k2}}{100} * \frac{U_{n2}^2}{S_{n2}} = \frac{9}{100} * \frac{6000^2}{9*10^6} = 0,36 \Omega$$

$$R_{t2} = \Delta P_{k2} * \frac{U_{n2}^2}{S_{n2}^2} = 0,01 * 10^6 * \frac{6000^2}{9*10^6^2} = 0,0044 \Omega$$

$$X_{t2} = \sqrt{Z_{t2}^2 - R_{t2}^2} = \sqrt{0,36^2 - 0,0044^2} = 0,35 \Omega$$

Impedance druhého transformátoru pro třetí harmonickou:

$$Z_{t2,3h} = \sqrt{3X_{t2}^2 + R_{t2}^2} = \sqrt{1,05^2 + 0,0044^2} = 1,05 \Omega$$

Impedance druhého transformátoru pro pátou harmonickou:

$$Z_{t2,5h} = \sqrt{5X_{t2}^2 + R_{t2}^2} = \sqrt{1,75^2 + 0,044^2} = 1,75 \Omega$$

Ad d)

V našem případě je zátěž tvořena pouze asynchronními motory. U těchto motorů vycházíme z hodnot nakrátko [3].

Zadané hodnoty:

U_n	400 [V]
η	0,8
$\cos\varphi_k$	$\rightarrow 0$
$I_{k1,2,3}$	3
I_{k4}	4
I_{k5}	4
$P_{1,2,3}$	50 [kW]
P_4	150 [kW]
P_5	200 [kW]

Obr.25: Zadané hodnoty pro spotřebiče

$$Z_M = \frac{1}{i_k} * \frac{U_n^2}{P} * \eta * \cos\varphi_k \quad 4.13$$

Protože účinník motoru $\cos\varphi_k \rightarrow 0$ můžeme napsat $Z_M = X_M$

$$R_M = 0,08 * X_M \quad 4.14$$

$$Z_{M1,2,3} = \frac{1}{i_{k1,2,3}} * \frac{U_n^2}{P_{1,2,3}} * \eta * \cos\varphi_k = \frac{1}{3} * \frac{400^2}{50 * 10^3} * 0,8 * 1 = 0,85 \Omega$$

$$R_{M1,2,3} = 0,08 * X_{M1,2,3} = 0,068$$

$$X_{M1,2,3} = \sqrt{Z_{M1,2,3}^2 - R_{M1,2,3}^2} = \sqrt{0,85^2 - 0,068^2} = 0,84$$

Impedance motorů $M_{1,2,3}$, pro třetí harmonickou:

$$Z_{M1,2,3,3h} = \sqrt{3X_{M1,2,3}^2 + R_{M1,2,3}^2} = \sqrt{2,52^2 + 0,068^2} = 2,52 \Omega$$

Impedance motorů $M_{1,2,3}$, pro pátou harmonickou:

$$Z_{M1,2,3,5h} = \sqrt{5X_{M1,2,3}^2 + R_{M1,2,3}^2} = \sqrt{2,52^2 + 0,068^2} = 4,02 \Omega$$

$$Z_{M4} = \frac{1}{i_{k4}} * \frac{U_n^2}{P_4} * \eta * \cos\varphi_k = \frac{1}{4} * \frac{400^2}{150 * 10^3} * 0,8 * 1 = 0,213 \Omega$$

$$R_{M4} = 0,08 * X_{M4} = 0,017$$

$$X_{M4} = \sqrt{Z_{M4}^2 - R_{M4}^2} = \sqrt{0,213^2 - 0,017^2} = 0,212$$

Impedance motoru M_4 , pro třetí harmonickou:

$$Z_{M4,3h} = \sqrt{3X_{M4}^2 + R_{M4}^2} = \sqrt{0,636^2 + 0,017^2} = 0,63 \Omega$$

Impedance motoru M_4 , pro pátou harmonickou:

$$Z_{M4,5h} = \sqrt{5X_{M4}^2 + R_{M4}^2} = \sqrt{1,06^2 + 0,017^2} = 1,06 \Omega$$

$$Z_{M5} = \frac{1}{i_{k5}} * \frac{U_n^2}{P_5} * \eta * \cos\varphi_k = \frac{1}{4} * \frac{400^2}{200 * 10^3} * 0,8 * 1 = 0,16 \Omega$$

$$R_{M5} = 0,08 * X_{M5} = 0,0128$$

$$X_{M5} = \sqrt{Z_{M5}^2 - R_{M5}^2} = \sqrt{0,16^2 - 0,0128^2} = 0,159$$

Impedance motoru M_5 , pro třetí harmonickou:

$$Z_{M5,3h} = \sqrt{3X_{M5}^2 + R_{M5}^2} = \sqrt{0,477^2 + 0,0128^2} = 0,477 \Omega$$

Impedance motoru M_5 , pro pátou harmonickou:

$$Z_{M5,5h} = \sqrt{5X_{M5}^2 + R_{M5}^2} = \sqrt{0,795^2 + 0,0128^2} = 0,795 \Omega$$

Výpočet celkové impedance zátěže pro třetí harmonickou:

$$Z_{Z,3h} = \left(\frac{1}{Z_{M1,3h}} + \frac{1}{Z_{M2,3h}} + \frac{1}{Z_{M3,3h}} + \frac{1}{Z_{M4,3h}} + \frac{1}{Z_{M5,3h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{2,52} + \frac{1}{2,52} + \frac{1}{2,52} + \frac{1}{0,63} + \frac{1}{0,477} \right)^{-1} = 0,205 \Omega$$

Výpočet celkové impedance zátěže pro pátou harmonickou:

$$Z_{Z,5h} = \left(\frac{1}{Z_{M1,5h}} + \frac{1}{Z_{M2,5h}} + \frac{1}{Z_{M3,5h}} + \frac{1}{Z_{M4,5h}} + \frac{1}{Z_{M5,5h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{4,02} + \frac{1}{4,02} + \frac{1}{4,02} + \frac{1}{1,06} + \frac{1}{0,795} \right)^{-1} = 0,339 \Omega$$

i_k – poměrný rozběhový proud

Ad e)

Výpočet impedance FKZ se počítá z maximálního kompenzačního výkonu, hodnoty reaktancí kondenzátorů a cívek vypočteme podle vztahu (2.11),(2.12).

$$X_{C1h} = \frac{U_{CN}^2}{Q_{C1stupeň}} = \frac{440^2}{30 * 10^3} = -j6,45 \Omega$$

$$X_{L1h} = -pX_{C1h} = 6 - 6,45 = j0,45$$

$$Z_{1h} = X_{L1h} + X_{C1h} = \sqrt{36} = 6 \Omega$$

Impedance filtru pro třetí harmonickou:

$$Z_{3h} = 0,79 * X_{L1h} + \frac{X_{C1h}}{0,79} = \sqrt{0,64} = 7,8 \Omega$$

Impedance filtru pro pátou harmonickou:

$$Z_{5h} = 1,3 * X_{L1h} + \frac{X_{C1h}}{1,3} = \sqrt{1} = 5 \Omega$$

Tyto výpočty byly udělány jen pro první stupeň kompenzace, zbytek impedancí je uveden v následujících tabulkách :

stupeň	XC	XL	Z
1	6,45	0,45	6
2	6,45	0,45	6
3	6,45	0,45	6
4	4,84	0,34	4,5
5	3,4	0,2	3,2

Obr.26: Reaktance všech stupňů FKZ pro 189Hz

stupeň	$XC,3h$	$XL,3h$	$Z,3h$
1	8,164	0,355	7,8
2	8,164	0,355	7,8
3	8,164	0,355	7,8
4	6,126	0,27	5,8
5	4,3	0,158	4,1

Obr.27: Reaktance všech stupňů FKZ pro třetí harmonickou (150 Hz)

stupeň	$X_C,5h$	$X_L,5h$	$Z,5h$
1	4,96	0,585	5
2	4,96	0,585	5
3	4,96	0,585	5
4	3,72	0,442	3,7
5	2,6	0,26	2,6

Obr.28: Reaktance všech stupňů FKZ pro pátou harmonickou (250 Hz)

Celková impedance FKZ pro třetí harmonickou:

$$Z_{FKZ,3h} = \left(\frac{1}{Z_{1,3h}} + \frac{1}{Z_{2,3h}} + \frac{1}{Z_{3,3h}} + \frac{1}{Z_{4,3h}} + \frac{1}{Z_{5,3h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{7,8} + \frac{1}{7,8} + \frac{1}{7,8} + \frac{1}{5,8} + \frac{1}{4,1} \right)^{-1} = 1,24 \Omega$$

Celková impedance FKZ pro pátou harmonickou:

$$Z_{FKZ,5h} = \left(\frac{1}{Z_{1,5h}} + \frac{1}{Z_{2,5h}} + \frac{1}{Z_{3,5h}} + \frac{1}{Z_{4,5h}} + \frac{1}{Z_{5,5h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{3,7} + \frac{1}{2,6} \right)^{-1} = 0,8 \Omega$$

Nyní se dostáváme k celkové impedanci sítě s FKZ pro třetí harmonickou:

$$Z_{SF,3h} = \left(\frac{1}{Z_{es} + Z_{vedení,3h} + Z_{t1,3h} + Z_{t2,3h}} - \frac{1}{Z_{FKZ,3h}} + \frac{1}{Z_{Z,3h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,35 + 0,545 + 1,073 + 1,05} - \frac{1}{1,24} + \frac{1}{0,205} \right)^{-1} = 0,227 \Omega \quad \mathbf{4.13}$$

Celková impedance sítě bez kompenzace pro třetí harmonickou :

$$Z_{S,3h} = \left(\frac{1}{Z_{es} + Z_{vedení,3h} + Z_{t1,3h} + Z_{t2,3h}} + \frac{1}{Z_{Z,3h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,35 + 0,545 + 1,073 + 1,05} + \frac{1}{0,205} \right)^{-1} = 2,97 \Omega \quad \mathbf{4.14}$$

Celkové impedanci sítě s FKZ pro pátou harmonickou:

$$Z_{SF,5h} = \left(\frac{1}{Z_{es} + Z_{vedení,5h} + Z_{t1,5h} + Z_{t2,5h}} - \frac{1}{Z_{FKZ,5h}} + \frac{1}{Z_{Z,5h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,35 + 0,903 + 1,78 + 1,75} - \frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,339} \right)^{-1} = 0,52 \Omega$$

Celková impedance sítě bez kompenzace pro pátou harmonickou :

$$Z_{S,5h} = \left(\frac{1}{Z_{es} + Z_{vedení,5h} + Z_{t1,5h} + Z_{t2,5h}} + \frac{1}{Z_{Z,5h}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,35 + 0,545 + 1,073 + 1,05} + \frac{1}{0,205} \right)^{-1} = 4,71 \Omega$$

Výsledné impedance dosadíme do rovnice (4.3) a vyjde nám činitel filtrace pro třetí a pátou harmonickou:

$$\rho_{F,3h} = \frac{U_{hF}}{U_h} = \frac{Z_{SF,3h}}{Z_{S,3h}} = \frac{0,227}{2,97} = 0,076$$

$$\rho_{F,5h} = \frac{U_{hF}}{U_h} = \frac{Z_{SF,5h}}{Z_{S,5h}} = \frac{0,52}{4,7} = 0,11$$

Závěr

V dnešní době s rozvojem polovodičových měničů je velice důležité odstraňovat jejich negativní vliv na síť. V první kapitole rozebírám zásadní problém, a to odběr neharmonických proudů těchto zařízení. Tyto neharmonické proudy se dají sečíst z více harmonických proudů s tzv. vyšších harmonických proudů. Ve druhé kapitole upozorňuji na to, že tento nelineární odběr ze sítě způsobuje vznik deformačního výkonu D , a že v obvodech kde se vyskytují polovodiče neplatí vztah pro účinník $\cos\varphi = \frac{P}{UI}$, ale zavádí se tzv. činitel výkonu λ , pro který platí $\lambda = \frac{P}{S}$. Účinník se snažíme zlepšit, z důvodu snížení odběru jalového výkonu ze sítě, který způsobuje zbytečné ztráty a nepříjemnosti v elektrické distribuční síti. Z tohoto důvodu se dále zabýváme metodami pro zlepšení účinníku. Tyto metody jsou buď bez přídavných zařízení, nebo s přídavnými zařízeními. První metodu zmíním pouze okrajově ve druhé kapitole, ale druhou možnost rozebereme hlouběji. Tam je možnost například: kondenzátoru, chráněné kompenzace a rotačního kompenzátoru. Jednou z nejčastějších metod je využití statického kondenzátoru, protože tato kompenzace je levná. Ale s nástupem polovodičových měničů, které znečišťují rozvodné síť harmonickými složkami, se začala využívat chráněná kompenzace. Kondenzátor je díky kompenzační tlumivce chráněn proti přetížení. Díky tomuto faktu nedochází ke zvýšení obsahu harmonických složek v síti a při správném návrhu jsou vyloučeny nebezpečné rezonance. Z tohoto důvodu se využívají ochranné tlumivky před kondenzátory. Ve třetí kapitole je ukázán praktický návrh klasické kompenzace a chráněné kompenzace pro určitý kmitočet. V této práci jsem si zvolil 189Hz a to z důvodu, že kmitočet HDO byl na 216,66 Hz. Náš rezonanční kmitočet jsem si zvolil s dostatečným odstupem,

abych nezpůsobil odfiltrování signálu HDO. Poté jsem spočetl potřebný celkový kompenzační výkon, který jsem ještě pro rezervu navýšili o 5-10%, tento celkový kompenzační výkon mi vyšel $Q_{celkový} = 186 \text{ kVA}$, pro tento výkon jsem navrhl chráněnou kompenzaci viz.: Obr.16 a klasickou kompenzaci viz.:Obr.17. Kompenzaci jsem navrhl pětistupňovou. Z tabulky je vidět, že celkový kompenzační výkon chráněné kompenzace je 164 kVAr, to je výkon, který jsem potřeboval, ale celkový výkon kondenzátorů je 186,2 kVAr, to je způsobeno tím, že ochranná tlumivka snižuje kompenzační výkon. Ochranná tlumivka také způsobuje, že na kondenzátoru se vyskytuje vyšší napětí, než na které je připojen. Což se samozřejmě u klasické kompenzace nevyskytuje. S tímto jevem musíme při návrhu počítat. Ve čtvrté kapitole rozebírám, jak se filtr chová po připojení do rozvodu elektrické energie. Důležitým faktorem je, co od filtru očekávám, jestli požaduji především filtrační účinek, musí být filtr navržen s tzv. minimálním kompenzačním účinkem, nebo stupněm zatlumení. V této práci mi vyšel kompenzační účinek $p_k = 0,8$ a filtrační účinek pro třetí harmonickou $p_{F,3h} = 0,076$. Dále jsem spočítal, filtrační účinek pro pátou harmonickou $p_{F,5h} = 0,11$. Tyto výsledky odpovídají teoretickým předpokladům. Dále bylo patrné při výpočtu impedance chráněné kompenzace, že kdybych dále zvyšoval frekvenci, tak by se impedance chráněné kompenzace změnila, z kapacitního charakteru na charakter induktivní.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAČÁT, VACULÍK, ZÁVIŠKA, Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť . Vyd. 1. Praha: SNTL, 1978.
- [2] KÚS. Rušivé vlivy měničů a jejich omezování, 1.vyd. Západočeská univerzita: Vydavatelství ZČU, 1996.
- [3] KÚS, SKÁLA, HAMMERBAUER, Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů, 1. vyd. Praha: BEN, 2013.
- [4] KÚS,. Vliv polovodičových měničů na napájecí síť, 1.vyd. Praha: BEN, 2002.
- [5] KÚS,. Nízkofrekvenční rušení, 1.vyd. Západočeská univerzita v plzni, 2003.
- [6] Bc. Luboš Cendelín, Návrh chráněné kompenzace účinníku. Plzeň 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická.
Dostupné z :
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3921/DiplomovaPraceCendelinLubos.pdf?sequence=1>
- [7] Ondřej Mišinger, Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele. Brno 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikační technologie.
Dostupné z :
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40148
- [8] Česká energetika.
Dostupné z : <http://www.ceskaenergetika.cz/>
- [9] Encyklopedie EMC.
Dostupné z : <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node21>
- [10] Ladislav Kotěšovec, Technické a ekonomické posouzení variant skupinové a centrální kompenzace. Plzeň 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická.
Dostupné z : <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/2713>
- [11] ELEKTRO časopis pro elektrotechniku.
Dostupné z : http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25987
- [12] KBH Energy, produkty-kompenzace jalového výkonu.
Dostupné z : <http://www.kbh.cz/fortis/kompenzacni-kondenzatory-forti>

