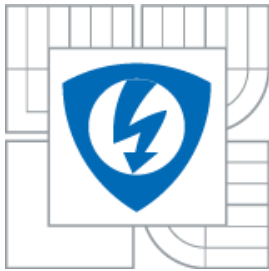




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU PRUMYSLOVÉHO ODBERATELE

THE REACTIVE POWER COMPENSATION OF THE INDUSTRIAL CONSUMER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ DOSEDĚL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Tomáš Doseděl
Ročník: 3

ID: 138511
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie kompenzace jalového výkonu
2. Prostředky pro kompenzaci
3. Příklad návrhu kompenzace
4. Návrh kompenzace průmyslového podniku

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

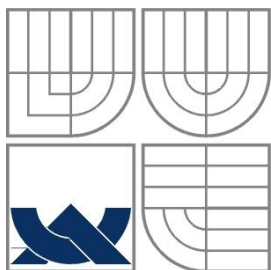
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

DOSEDĚL, T. *Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 54 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

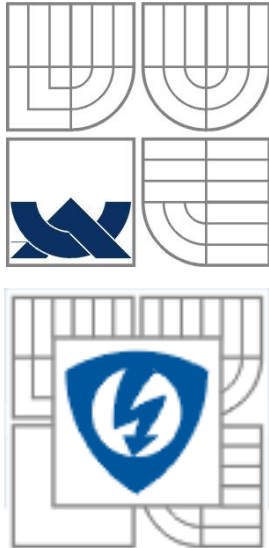
Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele

Tomáš Doseděl

vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelors's Thesis

The reactive power compensation of the industrial customers

by

Tomáš Doseděl

Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Práce se zabývá kompenzací jalového výkonu v praxi. V teoretické části práce jsou uvedeny základní principy kompenzace jalového výkonu. Dále zpoplatnění za nedodržení účinníku a popis jednotlivých kompenzačních komponentů. Praktická část řeší návrh kompenzátoru na hladině nízkého napětí pro průmyslového odběratele, včetně ekonomického zhodnocení. Kompenzátor je navržen jako centrální kompenzace se stupňovitým spínáním.

KLÍČOVÁ SLOVA: Jalový výkon; účinník; kompenzace jalového výkonu; sériová kompenzace; paralelní kompenzace; hrazená kompenzace; kompenzační kondenzátor; tlumivka

ABSTRACT

This thesis is about reactive-power compensation used in real practise. In theoretical part, basic principles of reactive-power compensation are stated. Also, charges for breaching power factor and overview of individual compensation components are dealt with. Practical part is about the design of a low voltage compensator for industrial customer. Compensator uses central compensation with gradual switching.

KEY WORDS: Reactive power; power factor; reactive power compensation; series compensation; parallel compensation; detuned reactive power compensation; capacitor for reactive power compensation; reactor

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD.....	14
2 ZÁKLADY KOMPENZACE.....	15
2.1 ELEKTRICKÝ VÝKON	15
2.2 DŮVODY KOMPENZACE	17
2.3 TARIFY, NORMY, CENA JALOVÉHO VÝKONU	20
3 ROZDĚLENÍ KOMPENZACE.....	22
3.1 PARALELNÍ KOMPENZACE.....	22
3.2 SÉRIOVÁ KOMPENZACE	23
4 ROZDĚLENÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ	25
4.1 PODLE UMÍSTĚNÍ.....	25
4.1.1 INDIVIDUÁLNÍ KOMPENZACE	25
4.1.2 SKUPINOVÁ KOMPENZACE	25
4.1.3 CENTRÁLNÍ KOMPENZACE	26
4.1.4 KOMBINOVANÁ KOMPENZACE.....	26
4.2 PODLE PRINCIPU ČINNOSTI	26
4.2.1 ROTAČNÍ KOMPENZÁTORY	26
4.2.2 STATICKÉ KOMPENZÁTORY	26
5 REGULACE KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	27
5.1 STUPŇOVITÁ REGULACE.....	27
5.2 PLYNULÁ REGULACE	27
5.2.1 PASIVNÍ S DEKOMPENZAČNÍMI ČLENY.....	27
5.2.2 AKTIVNÍ FILTRY	28
6 SPÍNÁNÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	29
6.1 KONTAKTNÍ SPÍNÁNÍ.....	29
6.2 BEZKONTAKTNÍ SPÍNÁNÍ	29
7 NÁVRH KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	30
7.1 JEVI OVLIVŇUJÍCÍ NÁVRH KOMPENZÁTORU:.....	30
7.2 KOMPENZAČNÍ VÝKON	31
7.3 NECHRÁNĚNÁ KOMPENZACE	33
7.4 CHRÁNĚNÁ KOMPENZACE	34
7.5 KOMPENZAČNÍ FILTRY	35
8 KOMPENZAČNÍ KOMPONENTY.....	37
8.1 KONDENZÁTORY	37

8.2 TLUMIVKY	37
8.3 REGULÁTORY	38
9 PŘÍKLAD	39
10 NÁVRH KOMPENZACE PRO PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE.....	43
10.1 ZPOPLATNĚNÍ ZA NEDODRŽENÍ ÚČINÍKU	43
10.2 NÁVRH KOMPENZÁTORU	45
10.3 ZHODNOCENÍ.....	51
11 ZÁVĚR.....	53
POUŽITÁ LITERATURA	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2 Fázorový diagram ideální indukčnosti a kapacity</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-3 Trojúhelník výkonů po kompenzaci</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-4 Nevykompenzovaná síť [7]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-5 Částečně kompenzovaná síť [7]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-6 Kompenzovaná síť [7]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-1 Vedení s paralelní kompenzací [1]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-2 Fázorový diagram paralelní kompenzace</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-3 Vedení se sériovou kompenzací [1]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-4 Fázorový diagram sériové kompenzace</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-5 Fázorový diagram celkové kompenzace úbytku napětí</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 5-1 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru [1]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 7-1 Jednoduchý sériový RLC článek</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 7-2 Kmitočtové charakteristiky L, C a LC filtru [1]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 10-1 Harmonické proudy</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 10-2 Harmonická napětí</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 10-3 Potřebný kompenzační výkon pro $\cos\varphi=0,95$ za období Prosinec 2012</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 10-4 Potřebný kompenzační výkon pro $\cos\varphi=0,9$ za období Leden 2013</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 10-5 Potřebný kompenzační výkon ($\cos\varphi=0,95$) za období Únor 2013</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 10-6 návratnost investice</i>	<i>52</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Jalové ztráty transformátoru naprázdno [5]</i>	20
<i>Tab. 2-2 Procentní přírážka za nedodržení účinníku pro rok 2012 [5]</i>	21
<i>Tab. 7-1 Maximální obsahy harmonických napětí a proudů kompenzačních článků dle ČSN 50160 [5]</i>	30
<i>Tab. 7-2 Individuální kompenzace trojfázových transformátorů [10]</i>	32
<i>Tab. 7-3 Konstanta pro převod účinníku nekompenzovaného zařízení [10]</i>	33
<i>Tab. 9-1 Kompenzační kondenzátory válcové [9]</i>	41
<i>Tab. 10-1 Tabulka odebrané energie, účinníku, měsíční přírážky a max. výkonu pro jednotlivé měsíce</i>	43
<i>Tab. 10-2 Ceny za rezervovanou kapacitu dle cenového rozhodnutí ERÚ [5]</i>	44
<i>Tab. 10-3 Cena za použití sítí VVN a VN dle cenového rozhodnutí ERÚ [5]</i>	44
<i>Tab. 10-4 Cena silové elektřiny při nedodržení účinníku podle cenového rozhodnutí ERÚ [5]</i>	44
<i>Tab. 10-5 Pokuta za nedodržení účinníku za jednotlivé měsíce</i>	44
<i>Tab. 10-6 Harmonické proudy, napětí a charakter sítě</i>	45
<i>Tab. 10-7 Min. a max. kompenzační výkon</i>	48
<i>Tab. 10-8 Rozdělení kompenzačních výkonů do stupňů</i>	48
<i>Tab. 10-9 Zvolené kondenzátory</i>	48
<i>Tab. 10-10 Zvolené stykače typ K3 Benedict</i>	48
<i>Tab. 10-11 Zvolené pojistky</i>	49
<i>Tab. 10-12 Přehled vodičů použitých v rozváděči</i>	50
<i>Tab. 10-13 Rozpočet kompenzačního zařízení</i>	51

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D	analogově/digitální	
C	kapacita	[F]
D	deformační výkon	[VA]
f_r	rezonanční frekvence	[Hz]
f_n	jmenovitá frekvence	[Hz]
F	činitel rozladění	[-]
FFT	Fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)	
HDO	hromadné dálkové ovládání	
I	celkový proud	[A]
I_j	jalový proud	[A]
I_ξ	činný proud	[A]
I_c	kapacitní proud	[A]
I_k	kompenzovaný proud	
k_p	stupeň kompenzace	
L	indukčnost	[H]
MKP	metallisierterkunststoff polypropylene (pokovená propylenová folie)	
n	řád harmonické	
N	počet kompenzačních stupňů	
NN	nízké napětí	
p	činitel zatlumení	
P	činný výkon	[W]
Q	činitel jakosti obvodu	
Q	celkový jalový výkon	[VAr]
Q_c	jalový výkon kapacitního charakteru	[VAr]
Q_k	kompenzovaný jalový výkon	[VAr]
R	činný odpor	[Ω]
S	celkový zdánlivý výkon	[VA]
S_k	zdánlivý výkon po kompenzaci	[VA]
THD(i)	celkové harmonické zkreslení proudu	
U	elektrické napětí	[V]
VN	vysoké napětí	

φ_C	fázový posuv kapacitního charakteru	[°]
φ_L	fázový posuv induktivního charakteru	[°]
ω	úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
ω_r	úhlová rychlost při rezonanci	[rad·s ⁻¹]
λ	opravdový účinník	[-]
ΔP	výkonové ztráty	[W]
ΔU	úbytek napětí	[V]

1 ÚVOD

Kompenzace jalového výkonu nebo též kompenzace účinníku se dostala do popředí zájmu z důvodu efektivnosti přenosu, snížení činných ztrát na vedení a odlehčení vedení. U nás se začala kompenzace jalového výkonu řešit přibližně v 70. letech dvacátého století, kdy se začal účtovat odběr jalového výkonu.

Elektrická síť kromě činné složky proudu přenáší i jalovou složku, kterou pro svou správnou funkci potřebuje většina dnes používaných spotřebičů. Kompenzace je založena na předpokladu, že potřebný jalový proud dodáme z jiného zdroje než z elektrárny přes vedení do spotřebiče. Toho dosáhneme pomocí kondenzátorů, které připojíme paralelně ke spotřebiči, jenž odebírá jalový proud.

V současnosti se projektanti kompenzačních zařízení setkávají s dvěma základními situacemi a to návrh nových kompenzačních zařízení nebo renovací stávajících kompenzačních zařízení. Základním problémem starších kompenzačních zařízení je, že jsou na hranici životnosti a že, se změnil charakter odebírané elektrické energie.

2 ZÁKLADY KOMPENZACE

Pro pochopení kompenzace je potřeba vysvětlit pojmy jako je činný a jalový výkon. Dále se uvede, jaký vliv má jalová složka výkonu na vedení a jak je tato problematika ošetřena z hlediska legislativy České republiky.

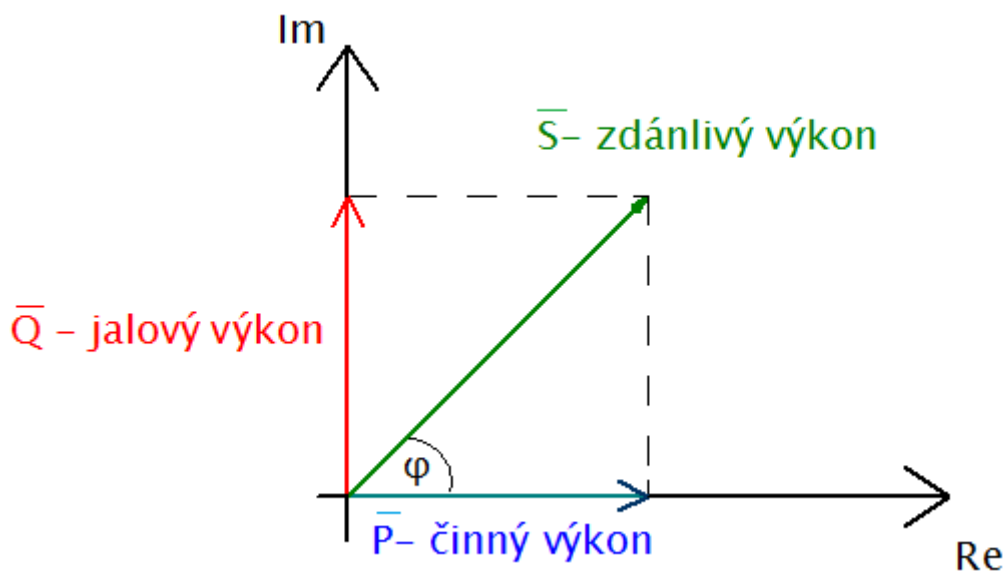
2.1 Elektrický výkon

Obecně je elektrický výkon dán jako součin napětí a proudu rovnice (2.1).

$$S = U \cdot I \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}] \quad (2.1)$$

Pokud je napětí a proud ve fázi tak je zdánlivý výkon roven činnému výkonu P . Na rozdíl od situace kdy proud je oproti napětí fázově posunut v tomto případě budeme získaný výkon nazývat zdánlivým S , který se skládá z činného výkonu P a jalového výkonu Q . Vztah mezi nimi je dán rovnicí (2.2) a vychází z trojúhelníku výkonů.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{VA}; \text{W}, \text{VAr}] \quad (2.2)$$



Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů

Činný výkon– Je výkon, který koná užitečnou práci, to znamená, že se mění v elektrických spotřebičích na jiný druh energie. U elektrických motorů vytváří moment na hřídeli, u přímotopů se mění na teplo nebo u žárovek na světlo. U činného výkonu je proud a napětí ve fázi a je dán vzorcem.

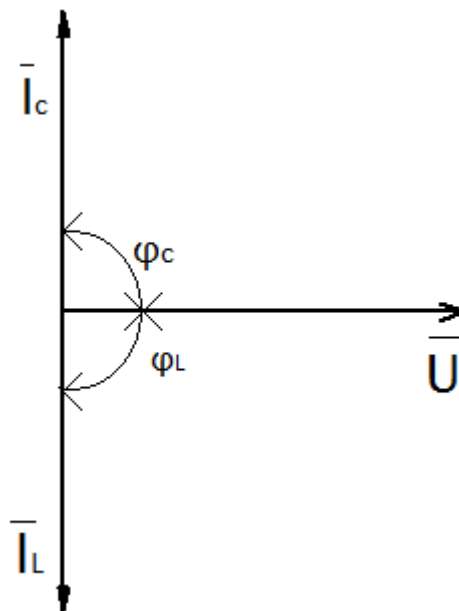
$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = U \cdot I_{\zeta} \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (2.3)$$

Jalový výkon – Je výkon, který nekoná užitečnou práci, jeho střední hodnota se rovná nule, slouží k vytváření elektromagnetických polí, zdrojem jsou buď cívky nebo kondenzátory. U jalového výkonu je proud fázově posunut oproti napětí. U cívky předbíhá napětí proud o 90° a u kondenzátoru se napětí zpožďuje za proudem o 90° . Bez jalového výkonu by nebylo možné provozovat žádné stroje, kde se vyskytuje vinutí, tedy transformátory, synchronní a asynchronní motory, zářivky, indukční pece. Jalový výkon je dodáván ze sítě stejně jako činný, ale na rozdíl od činného výkonu není spotřebováván a to vede k tomu, že kmitá mezi zdrojem a spotřebičem a zatěžuje vedení.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U \cdot I_j \quad [\text{VAr}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (2.4)$$

Účinník $\cos\varphi$ – Je kosinus úhlu fázového posunu mezi první harmonickou proudem a napětím udává poměr mezi činným a zdánlivým výkonem nebo také fázový posuv mezi napětím a proudem. Říká nám jak velká část zdánlivého výkonu je tvořena činným výkonem. Pokud je v obvodu cívka bude mít účinník induktivní charakter φ_{L_V} případně, že je v obvodu kondenzátor tak kapacitní charakter φ_C . Pro ideální odpor bude účinník roven jedné, nedojde k fázovému posuvu napětí a proudu.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad [-; \text{W}, \text{VA}] \quad (2.5)$$



Obr. 2-2 Fázorový diagram ideální indukčnosti a kapacity

Deformační výkon – Je výkon, který se vyskytuje v obvodech s obsahem harmonických složek proudu a napětí a zvětšuje zdánlivý výkon. Deformační výkon označíme D a pro celkový výkon platí rovnice (2.6).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad [\text{VA}; \text{W}, \text{var}, \text{VA}] \quad (2.6)$$

Opravdový účinník λ - Je účinník, který v sobě zahrnuje i vyšší harmonické proudy a napětí.

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad [-; W, VA] \quad (2.7)$$

2.2 Důvody kompenzace

Většina spotřebičů elektrické energie potřebuje pro svou činnost magnetické pole. K vytvoření tohoto pole je potřeba právě jalový výkon. To znamená, že spotřebič bude odebírat ze sítě kromě činného také jalový proud. Proto bude vedení zatěžováno celkovým proudem I dle vztahu (2.8). Na velikost tohoto proudu se musí dimenzovat celá elektrizační soustava.

$$I = \sqrt{I_c^2 + I_j^2} \quad [A] \quad (2.8)$$

Protože elektrická vedení nemají nulový odpor, vznikají na nich průchodem proudu jak ztráty výkonu tak se zvětšuje úbytek napětí podle níže uvedených rovnic.

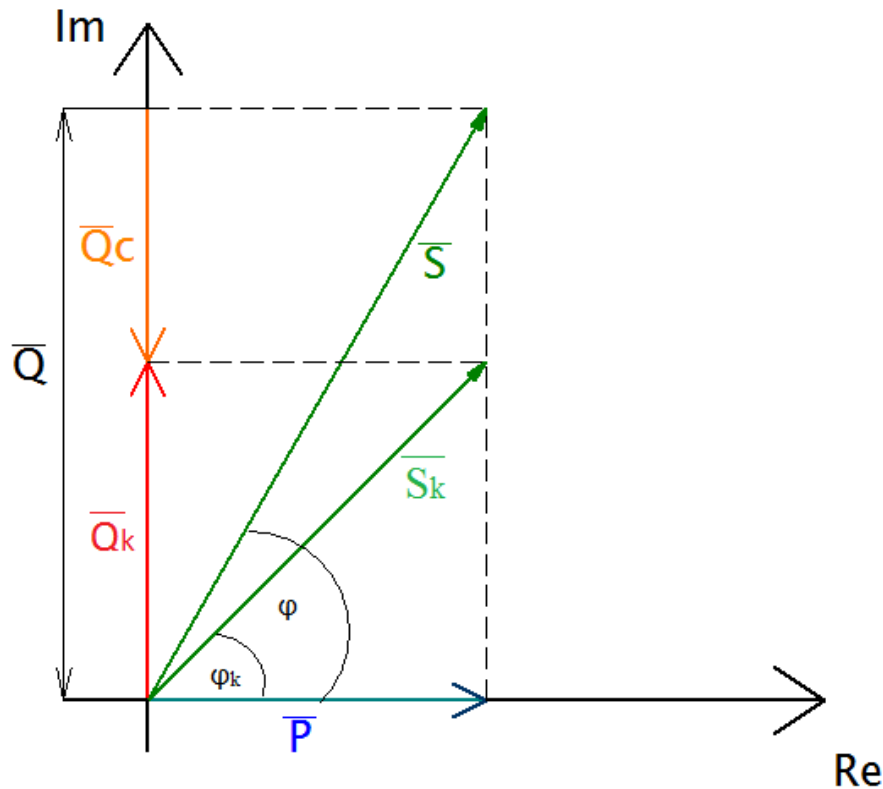
Výkonové ztráty:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot (I_c^2 + I_j^2) \quad [W; \Omega, A] \quad (2.9)$$

Úbytek napětí na vedení:

$$\Delta U \cong R \cdot I_c + X \cdot I_j [V; \Omega, A] \quad (2.10)$$

Z předcházejících vztahů vyplývá, že na činném výkonu se podílí pouze činná složka proudu, ale na ztrátách na vedení se podílí kromě činné složky také jalová složka. Proto je snaha zmenšit přenášený jalový proud aby nebyla zbytečně zatěžována elektrizační soustava a zmenšily se ztráty při přenosu elektrické energie. Na obrázku (2-3) je vidět, jak se po použití paralelní kompenzace změnil trojúhelník výkonu. Činný výkon zůstává stejný ale zdánlivý a jalový výkon se zmenšil oproti stavu, kdy nebyl kompenzován



Obr. 2-3 Trojúhelník výkonů po kompenzaci

P – činný výkon

Q - celkový jalový výkon před kompenzací

Q_c - jalový výkon dodaný kompenzačním kondenzátorem

Q_k -jalový výkon po kompenzaci

S - zdánlivý výkon před kompenzací

S_k - zdánlivý výkon po kompenzaci

$\cos\varphi$ – účinník před kompenzací

$\cos\varphi_k$ –účinník po kompenzaci

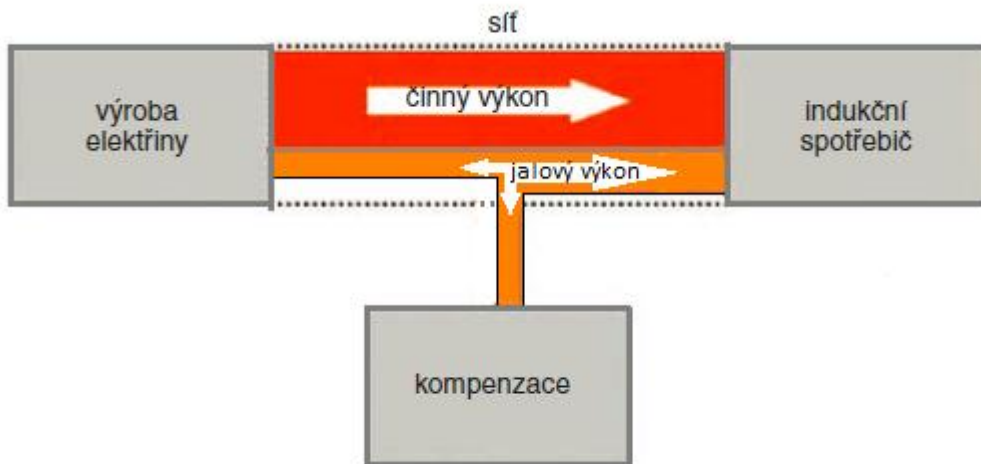
Pro zmenšení úbytků napětí se použije sériová kompenzace v případě snahy zmenšit jalový proud paralelní kompenzace. Důsledkem zmenšení jalového proudu je odlehčení vedení to znamená, že můžeme přenést větší činný výkon bez toho, aby bylo potřeba použít vodiče s větším průřez.

Kompenzace jalového výkonu se zakládá na tom, že potřebný jalový výkon se dodá z jiného zdroje než z generátoru v elektrárně. Nejčastěji se používají statické kondenzátory dříve i synchronní kompenzátory, které dnes nejsou moc časté. Tyto kompenzační zařízení se umísťují co nejbližší kompenzovaného zařízení, aby byla odlehčena co největší část vedení, protože kompenzovaná bude jen část mezi kompenzátoem a zdrojem elektrické energie. S ohledem na kompenzaci, mohou na vedení nastat tři stavy, za prvé vedení není kompenzováno a jalový výkon kmitá mezi zdrojem a spotřebičem (Obr. 2-4). Pokud je vedení částečně kompenzováno tak část jalové energie kmitá mezi spotřebičem a

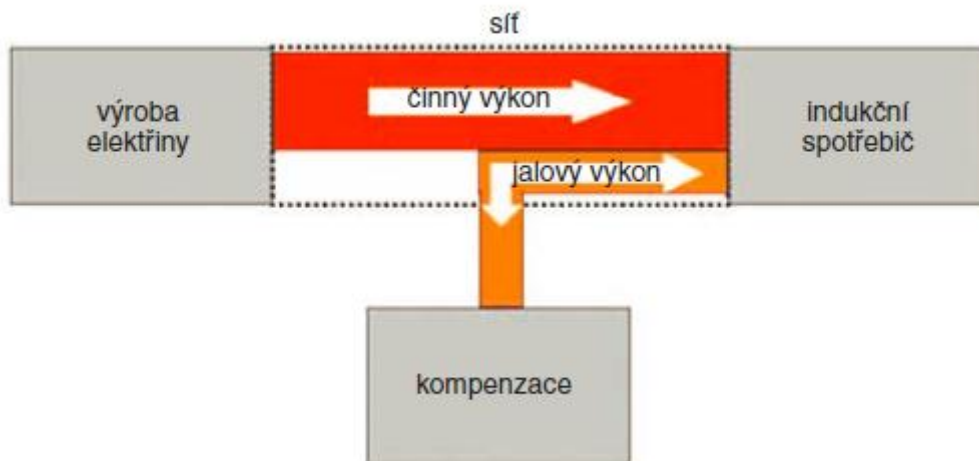
kompenzačním zařízením (Obr. 2-5). Při úplném vykompenzování kmitá jen mezi kompenzačním zařízením a spotřebičem a vůbec nezatěžuje vedení (Obr. 2-6).



Obr. 2-4 Nevykompenzovaná síť [7]



Obr. 2-5 Částečně kompenzovaná síť [7]



Obr. 2-6 Kompenzovaná síť [7]

2.3 Tarify, normy, cena jalového výkonu

Tato kapitola vychází z platné legislativy České republiky v době psaní této práce, vychází z nařízení Energetického regulačního úřadu Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2012ze dne 30. listopadu 2012 [5].

Odběratel elektrické energie je povinen zajistit aby v odběrném místě byla hodnota induktivního účinníku $\cos\varphi$ 0,95 až 1,0. Toto neplatí, pokud se odběratel dohodl s provozovatelem distribuční soustavy na jiném účinníku. Tato povinnost se týká odběratelů:

- kategorie A: odběrné zařízení je připojeno na přenosovou soustavu dodavatele nebo distribuční soustavu dodavatele o napětí mezi fázemi nad 52KV
- kategorie B: odběrné zařízení je připojeno na rozvodné zařízení dodavatele o napětí mezi fázemi od 1kV do 52kV
- kategorie C: odběrné místo je připojeno na rozvodné zařízení dodavatele o napětí mezi fázemi do 1kV a odběr neslouží k uspokojování osobních potřeb fyzických osob (odběr domácností).

Pro stanovení účinníku se používají výsledky měření odběru jalové a činné energie ve stejném časovém období, získané během čtvrt hodinového měření činné a jalové energie. Vyhodnocení účinníku se provádí podle měření jakým je odběrné místo vybaveno pro typ A a B je to po dobu 24 hodin denně pro typ C je to v době stanové provozovatelem distribuční soustavy. Zpětná dodávka jalové energie se měří po celý den.

Pokud je měření prováděno na sekundární straně transformátoru tak se k činné energii přičtou činné ztráty transformátoru a k jalové energii jalové ztráty transformátoru naprázdno dle následující tabulky a vynásobí se dobou měření jalového výkonu v hodinách, pokud nejsou na transformátoru kompenzovány jalové ztráty naprázdno.

Tab. 2-1 Jalové ztráty transformátoru naprázdno [5]

Jmenovitý výkon transformátoru (kVA)	Měsíční hodnota jalových transformačních ztrát v pásmu 1 hodiny (kVArh)		
	do 22 kV	35kV	110 kV
<250	-	-	-
250	145	160	-
400	183	207	-
630	230	249	-
1 000	289	320	-
1 600	365	404	-
2 500	989	989	-
4 000	1 339	1339	-
6 300	1 918	1 918	-
10 000	2 739	2 739	2 739
16 000	4 140	4 140	4 140
25 000	6 088	6 088	5 707
40 000	7 914	7 914	7 914
63 000	-	-	11 505

Pokud se hodnota účinníku pohybuje mezi $\cos \varphi$ 0,95-1,0 neplatí odběratel žádnou přírážku k ceně odebrané energie. Velikost přírážky se stanovuje dle tabulky (2-2) a dle velikosti $\operatorname{tg} \varphi$, jenž se vypočte dle vzorce (2.11) a jemu odpovídající $\cos \varphi$.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{W} \quad [-; \text{Wh, VArh}] \quad (2.11)$$

Tab. 2-2 Procentní přírážka za nedodržení účinníku pro rok 2012 [5]

Pásma účinníku	Procentní přírážka za nedodržení účinníku				
	tg φ min	tg φ max	cos φ min	cos φ max	Přírážka
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0	0,328	0,950	1	0
2	0,329	0,484	0,900	0,949	2,85
3	0,485	0,750	0,800	0,899	12,38
4	0,751	1,020	0,700	0,799	28,07
5	1,021	1,333	0,600	0,699	48,58
6	1,334	a více	0	0,599	100,00

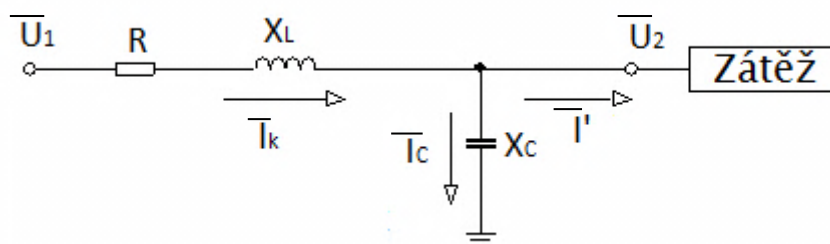
Za nevyžádanou dodávku jalové energie do distribuční soustavy se účtuje tomuto dodavateli cena ve výši 440 Kč/MVArh. Tato platba se nevyžaduje, pokud dodávka jalové energie netrvá déle než 90 sekund a v oblasti kapacitního účinníku nabývá hodnot 0,999-1,000 [5].

3 ROZDĚLENÍ KOMPENZACE

Tato kapitola se podrobněji zabývá rozdělením kompenzace na sériovou a paralelní, o nichž byla zmínka v předcházející kapitole. Sériová kompenzace slouží ke zlepšení napět'ových poměrů na vedení a paralelní k zlepšení výkonových poměrů na vedení.

3.1 Paralelní kompenzace

Jak bylo řečeno v předcházejících kapitolách principem paralelní kompenzace je připojení kondenzátoru paralelně k zátěži mezi vedením a zátěží a tím snížit ztráty na vedení.



Obr. 3-1 Vedení s paralelní kompenzací [1]

Po připojení kondenzátoru paralelně k zátěži dojde ke změně proudu I' na velikost I_k a celkový proud bude dán vztahem.

$$I_k = I' + I_c \quad [\text{A}] \quad (3.1)$$

Předpokladem je, že činný výkon bude po kompenzaci stejný jako před kompenzací tj. konstantní a i napětí U_2 na konci vedení bude stejné jako před kompenzací tak pro činný výkon platí

$$P_2 = \sqrt{3}U_2 I_c \cos\varphi = \sqrt{3}U_2 I_k \cos\varphi_k \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (3.2)$$

a hodnota kompenzovaného proudu I_k bude

$$I_k = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_k} \quad [\text{A}; -] \quad (3.3)$$

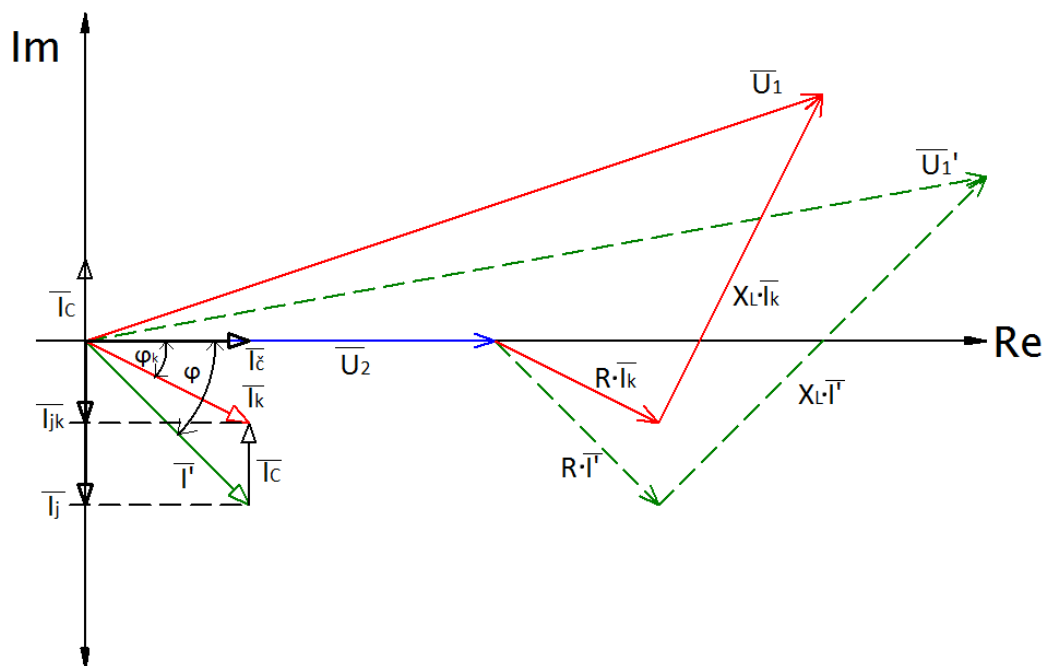
kde $\cos\varphi$ je hodnota účinníku před kompenzací a $\cos\varphi_k$ je hodnota účinníku po kompenzací.

Poměr mezi jalovým výkonem před, a po kompenzací se nazývá stupeň kompenzace k_p a pokud je roven nule tak bylo vedení zcela vykompenzováno.

$$k_p = \frac{I_{jk}}{I_j} = 1 - \frac{I_c}{I_j} \quad [-; \text{A}] \quad (3.4)$$

Pro návrh potřebného výkonu kondenzátoru vyjdeme z trojúhelníku výkonů a znalosti účinníku před kompenzací a požadovaného účinníku.

$$Q_c = P(\text{tg}\varphi - \text{tg}\varphi_k) [\text{var}; \text{W}, -] \quad (3.5)$$

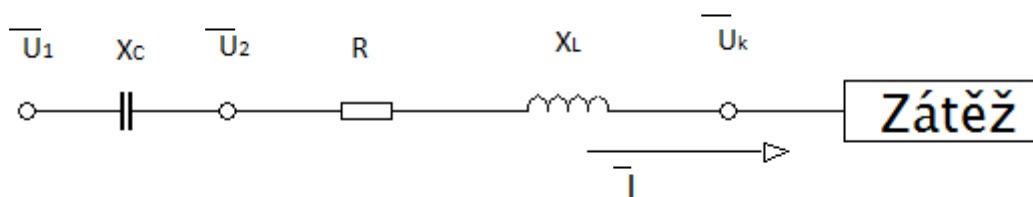


Obr. 3-2 Fázorový diagram paralelní kompenzace

Na fázorovém digramu zelenou barvou naznačena situace před kompenzací a červenou po kompenzací.

3.2 Sériová kompenzace

Slouží ke kompenzaci úbytku napětí na velmi dlouhém vedení, kompenzační kondenzátor se připojuje sériově s vedením, kde kompenzuje podélnou impedanci vedení. Kondenzátor se zapojuje na začátek vedení nebo nejdále do 2/3 jeho délky a musí se dimenzovat na celkový proud, který protéká vedením.



Obr. 3-3 Vedení se sériovou kompenzací [1]

4 ROZDĚLENÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola se bude zabývat rozdělením paralelní kompenzace dle umístění a technické realizace kompenzačních zařízení, s nimiž je možno setkat se v praxi dle literatury [1].

4.1 Podle umístění

Umístění kompenzačního zařízení je důležitou částí v návrhu kompenzačních zařízení. Místo kde bude kompenzační zařízení umístěno, ovlivňuje jak jeho dimenzování, tak dimenzování kabelů.

4.1.1 Individuální kompenzace

V tomto případě se kompenzační zařízení připojuje přímo na svorky kompenzovaného zařízení nebo v jeho těsné blízkosti. Kompenzace se připojuje se zapnutím kompenzované zařízení. Při použití individuální kompenzace bude kompenzována celá elektrizační soustava mezi zdrojem a spotřebičem. Používá se například pro kompenzaci asynchronních motorů, transformátorů a kompenzaci zářivkových a výbojkových svítidel. Bez jištění je možno připojovat kondenzátory jedině když jsou opatřeny vnitřními pojistkami.

Výhody:

- Největší úspora výkonových ztrát na vedení a zmenšení úbytku napětí.
- Nehrozí překompenzování díky souběžnému zapínání a vypínání se spotřebičem.
- Díky své jednoduchosti je velmi spolehlivá.

Nevýhody:

- Velké množství potřebných zařízení a doba využitelnosti připojených spotřebičů výrazně prodlužuje dobu návratnosti investice.
- Dále může docházet k samobuzení a nebezpečným přepět'ovým stavům.

4.1.2 Skupinová kompenzace

Kompenzační zařízení se připojuje na přípojnice podružného rozvaděče pro skupinu spotřebičů, proto je odlehčeno vedení od rozvaděče ke zdroji. Používá se u spotřebičů, které jsou provozovány krátkodobě nebo v určitém časovém intervalu. Kompenzačního zařízení se musí projektovat na soudobý odebíraný výkon.

Výhody:

- Menší potřebný výkon díky soudobosti a zmenšení množství kondenzátorů.

Nevýhody:

- Nutná regulace z důvodu změn odebíraného jalového výkonu.

4.1.3 Centrální kompenzace

Obdobná jako skupinová kompenzace akorát se připojuje na přípojnice vstupní trafostanice podniku, případně k hlavní rozvodně.

Výhody:

- Díky soudobosti menší potřebný kompenzační výkon.

Nevýhody:

- Nutnost pořízení regulátoru.
- Většinou se řeší na straně vyšších napětí, což zvyšuje cenu kompenzačních komponentů.

4.1.4 Kombinovaná kompenzace

Jak název napovídá je kombinací více uvedených možností kompenzace. V rozsáhlých průmyslových sítích bývá poměrně rozšířeným způsobem kompenzace.

4.2 Podle principu činnosti

4.2.1 Rotační kompenzátory

Pro kompenzaci jalového výkonu lze použít synchronní elektrické stroje. Jejichž důležitou vlastností je, že samostatně budící vinutí napájené ze stejnosměrného zdroje dodává energii pro magnetické pole. Pokud budeme měnit velikost budícího proudu tak touto změnou vyvoláme změnu účinníku odběru elektrického stroje. Teno účinník tak může nabývat hodnot jak v induktivní tak kapacitní oblasti. Pokud synchronní stroj pracuje jako kompenzátor tak pracuje naprázdno tedy s velmi malou spotřebou činné energie a velkým rozsahem regulace jalového výkonu.

Synchronní kompenzátory se používají pro kompenzaci převážně sítí 6 kV. Největší nevýhodou synchronních kompenzátorů je relativně pomalá regulace proto se nedoporučuje používat tam, kde je velká dynamika ve změně jalové energie.

Vzhledem ke svým parametrům se synchronní stroje jako kompenzátory používají k centrální kompenzaci průmyslových sítí. Připojují buď přímo na přípojnice rozveden 6 kV nebo přes transformátor 22kV/6kV na přípojnice hlavních rozveden. V současnosti se již moc nevyužívá kompenzace pomocí synchronních strojů z důvodů nákladů na provoz, údržbu a prostor.

4.2.2 Statické kompenzátory

Sem patří ostatní kompenzační zařízení vyjma synchronních kompenzátorů. Velkou výhodou oproti synchronním kompenzátorům je nezávislost na činné energii, menší velikost, cena. Jako statické kompenzátory se používají buď výkonové kondenzátory případně aktivní filtry. Problematika kondenzátorů se řeší v kapitole kondenzátory.

5 REGULACE KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Dle literatury [1] se regulace kompenzačních zařízení používá tam kde je velká dynamika ve změně odebíraného jalového výkonu. To znamená, že je potřeba měnit výkon kompenzačních zařízení. Toho se dosáhne pomocí tzv. kompenzačních baterií což, je několik kondenzátorů o různých velikostech zapojených paralelně k místu kompenzace.

5.1 Stupňovitá regulace

Při tomto způsobu regulace se kompenzační výkon mění skokově, což klade velké požadavky na správnou volbu velikosti kompenzačních stupňů. Při nevhodně zvolené velikosti kompenzačních stupňů by mohlo dojít k nedostatečné kompenzaci nebo překompenzování. Používá se na hladinách nízkého tak i vysokého napětí a využívá jak kontaktního tak bezkontaktního spínání.

Volba kompenzačního stupně závisí na velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě vykompenzování obvykle $\cos\varphi \geq 0,95$, neboli $\operatorname{tg}\varphi \leq 0,33$. Potom musí být splněn vztah:

$$\operatorname{tg}\varphi \geq \frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \quad [; \text{VAr, W}] \quad (5.1)$$

kde

Q_L ...jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu P

Q_C ...jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

N ...počet stupňů.

Z principu stupňovité kompenzace a rovnice (5.1) vyplývá, že nelze kompenzovat jalový výkon rovný výkonu jednoho kompenzačního stupně. V praxi se volí připínané stupně různě velké [1].

5.2 Plynulá regulace

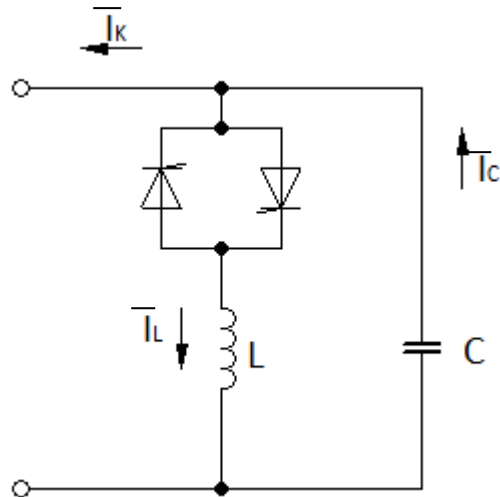
Na rozdíl od stupňovité regulace můžeme u plynulé plynule měnit velikost kompenzačního výkonu. Proto nedochází při změně odebíraného jalového výkonu k překompenzování tj. dodávce proudu kapacitního charakteru.

5.2.1 Pasivní s dekompenzačními členy

Pro plynulé řízení kompenzačního výkonu použijeme tlumivku ovládanou antiparalelně zapojeným tyristorovým spínačem. Kompenzační proud zmenšujeme pomocí zvětšování proudu protékajícího tlumivkou. Takto zapojená tlumivka se nazývá dekompenzační. Pomocí tyristorového spínače nemůže přímo řídit proud protékající kondenzátory z důvodu přechodových dějů. Proto se tlumivka s řídicím členem zapojuje paralelně ke kondenzátoru. Potom pro kompenzační proud platí dle obrázku (5.1) rovnice

$$I_K = I_C - I_L \quad [A] \quad (5.2)$$

a kompenzační proud se mění v rozmezí $0 \leq I_K \leq I_L$. Na obrázku (5.1) je jednofázové zapojení, ale v praxi se převážně používá třífázové zapojení.



Obr. 5-1 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru [1]

5.2.2 Aktivní filtry

Nepatří mezi klasické způsoby kompenzace, jedná se o paralelně nebo sériově zapojené generátory, které zajišťují hlavně kompenzaci harmonických složek a to jak napětí, tak proudu samozřejmě mohou sloužit i ke kompenzaci jalového výkonu.

Paralelně zapojení aktivní filtr tvoří řízený generátor proudu, který upravuje vlastnosti sítě od zdroje ke spotřebiči. Vyšší harmonické kompenzuje generováním shodných složek s opačným směrem. Skládá se z IGBT tranzistorů v můstkovém zapojení a kondenzátoru.

V případě sériového zapojení je zapojen mezi svorky sítě a je tvořen generátorem napětí, který upravuje parametry sítě od napájecí strany ke spotřebiči. Sériový filtr umožňuje upravovat přiváděné napětí tj. velikost amplitudy, kompenzovat špičky a poklesy atd.

V případě potřeby se můžou použít kombinované filtry, které v sobě mají zakomponovaný jak sériový filtr, tak paralelní filtr.

6 SPÍNÁNÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Kompenzační zařízení tvoří obvody s kondenzátory, což znamená, že jsou setrvačné. Změny v obvodu se projeví s určitým časovým zpožděním a vyvolají přechodné děje. U kondenzátorů to jsou zapínací i vypínací proudy, jejichž velikost je omezena zkratovými poměry sítě, impedancí obvodu, okamžikem sepnutí a můžou dosahovat až 100násobku ustáleného proudu. Tyto skutečnosti jsou důležité hlavně pro kontaktní spínání.

6.1 Kontaktní spínání

Jedná se o připojování kompenzačních zařízení pomocí stykačů. Může se použít tam kde obsah harmonických signálů v síti je malý a rychlost změny potřebného kompenzačního výkonu je malá. Nevýhodou kontaktní spínačů jsou velké proudové rázy při připnutí. Při nesymetrickém spínání dochází k impulsnímu rušení, které se po té šíří sítí. Dále při spínání kontakty několikrát odskočí, než vytvoří proudovodnou dráhu, což vede k opalování kontaktů a snižování životnosti.

Kontaktní spínání se může realizovat pomocí klasických stykačů. Používané stykače dovolují proudové přetížení do desetinásobku jmenovitého proudu, ale životnost zařízení je malá maximálně 10^4 sepnutí. Proudové rázy se omezují pomocí zvýšením impedance přívodů ke kondenzátorům pomocí vzduchové tlumivky nebo odporu.

Dalším způsobem kontaktního spínání je pomocí odporového spínání. Zde spínání probíhá postupně prve přes odpor předstihového kontaktu a po odeznění přechodného děje přebírá ustálený proud hlavní kontakt. Životnost takových zařízení je 3×10^5 sepnutí.

6.2 Bezkontaktní spínání

Tam kde je velká rychlost změny jalového výkonu tam, se používají bezkontaktní spínače. Bezkontaktní spínání je realizováno pomocí tyristorů. U nich nedochází k přechodným dějům, protože spínají při průchodu napětí nulou a mohou spínat v časech jedné periody síťového kmitočtu (20ms). Je nutno použít rychlejší regulátory jalového výkonu pro ovládání spínačů a vždy se využívá hrazené kompenzace.

7 NÁVRH KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Návrh kompenzačního zařízení je kompromis mezi ekonomickou a technickou náročností provedení. Při návrhu kompenzátoru je potřeba znát velikostí kompenzačního výkonu, zkratové poměry, harmonické proudy a napětí, atd. To znamená určit, jaké vlivy se mohou vyskytnout v síti a jak budou ovlivňovat kompenzační zařízení.

7.1 Jevy ovlivňující návrh kompenzátoru:

Výskyt harmonických proudů a napětí:

Harmonické proudy negativně ovlivňují mnohá elektrická zařízení. Kondenzátory jsou na příliš vysoké harmonické velmi citlivé a mohou způsobit jejich přehřívání velkými proudy. To vede ke snížení životnosti a až jejich zničení. Proto je při návrhu nutné přihlídnout k THD(i) celkovému harmonickému zkreslení proudu podle literatury [7] a [1] ze které vychází tato kapitola.

Podkladem pro výběr kompenzačního zařízení může být měření poměrů v dané síti. Změříme harmonické proudy při nejvyšším zatížení bez kompenzátoru v napájecím obvodu od transformátoru. Naměřený výkon S a jmenovitý výkon transformátoru S_n spolu se změřeným THD(i) ve stejném časovém intervalu použijeme pro porovnávací výpočty, které definují tři typy sítí.

1. Síť minimálně zatížená harmonickými - $\text{THD}(i) \cdot S/S_n \leq 5 \%$

Tento typ sítě je minimálně zatížen harmonickými složkami proudu a proto je možno v sítích 400V použít kondenzátory se jmenovitým napětím 400/415V.

2. Síť mírně zatížená harmonickými - $5 \leq \text{THD}(i) \cdot S/S_n \leq 10 \%$

V těchto sítích je obsah harmonických vyšší, ale není potřeba specializovaného řešení kompenzátoru. Použijí se v sítích čtyřstavitů předimenzované kondenzátory se jmenovitým napětím 480V.

3. Síť silně zatížená harmonickými - $10 \leq \text{THD}(i) \cdot S/S_n \leq 20 \%$

Tyto sítě mají velmi vysoký obsah harmonických proudů a je nutno počít s hrazenou kompenzací

Zdrojem harmonických proudů na straně odběratele mohou být kompaktní zářivky, obloukové pece, spínané zdroje, polovodičové můstky. V sítích se také mohou vyskytovat meziharmonické,

Tab. 7-1 Maximální obsahy harmonických napětí a proudů kompenzačních článků dle ČSN 50160 [5]

Řád harmonické n	kmitočet [Hz]	Obsah harmonických v napětí [%]	Obsah harmonických v proudu [%]	Poznámky
1	50	100	100	základní harmonická
2	100	2	5,2	Výskyt netypický
3	150	5	37,8	Nevyskytuje se u symetrických zátěží
4	200	1	30,8	U svářecích strojů a obloukových pecí
5	250	6	37,2	Typická pro tyristorové měniče
6	300	0,5	8	Jen při poruchových stavech zařízení
7	350	5	13,4	Typická pro tyristorové měniče

U třetí harmonické a jejích násobků platí, že mají z hlediska složkových soustav nulový charakter. Nulový charakter znamená nulový fázový posuv mezi vektory proudu jednotlivých fází. To znamená, že středním vodičem teče proud s kmitočtem třetí harmonické a jejích násobků.

Meziharmonické frekvence jsou neceločíselným násobkem základní harmonické. Jsou generovány rychlými změnami výkonů nebo asynchronním spínáním. Jejich velikost nepřesahuje 0,5% základní harmonické, ale v rezonanci může být vyšší.

Signál HDO

Signál HDO slouží k ovládání spotřebičů elektrické energie je přenášen pomocí silového vedení na frekvencích 183,33 Hz, 216,66 Hz, 283,33 Hz, 760 Hz a 1060 Hz. U nás se nejčastěji používá frekvence 216,66 Hz. Při návrhu kompenzačního zařízení s hrazenou kompenzací nebo nehrazenou, se musí brát ohled na signál HDO. Nesmí být příliš potlačen kompenzačním zařízením a nesmí ani dojít k rezonanci.

Kolísání napětí – Flikr

Tento jev se projevuje hlavně u zařízení s velkým výkonem a velmi proměnlivým odběrem proudu. Projevuje se hlavně kolísáním jasu nebo spektrálního rozložení, které způsobí nestálost zrakového vjemu. Vliv na velikost flikru má zkratový výkon sítě, kompenzační zařízení a kompenzované zařízení.

Je předepsáno, že hodnota krátkodobé míry vjemu flikru P_{st} a dlouhodobé míry vjemu flikru P_{lt} musí být pod kompatibilními úrovněmi $P_{st} = 1,0$ a $P_{lt} = 0,8$. Přesnou velikost flikru nelze vypočítat lze zjistit jenom přibližnou hodnotu pomocí empirických vztahů [6].

Další parametry, které je nutno brát v úvahu při návrhu kompenzačních zařízení jsou požadovaný účinník, nesymetričnost proudu v jednotlivých fázích, jež způsobí nesymetričnost napětí v síti, velikost kompenzačního zařízení tj. jestli bude potřebovat vlastní budovu, platí hlavně pro velké výkony. Zařízení menších výkonů lze řešit pomocí kompenzačních rozvaděčů.

7.2 Kompenzační výkon

Pro stanovení potřebného kompenzačního výkonu pomocí výpočtů využijeme poznatky uvedené v kapitole Základy kompenzace. Při návrhu se vychází z požadovaného účinníku, může se také vycházet i z jiných požadavků například zmenšení zdánlivého výkonu, zmenšení ztrát při přenosu a dalších. Návrh kompenzačního výkonu se může dělat pomocí nomogramů nebo tabulkových hodnot.

Stanovení pomocí výpočtů:

Vychází se z diagramu paralelní kompenzace, předpokladem je, že činný výkon před a po kompenzací je konstantní.

Pro kompenzační výkon platí

$$Q_K = P \cdot (tg \varphi - tg \varphi_K) \quad [\text{kVAr}; \text{kW}, -] \quad (7.1)$$

Pro stanovení kompenzačního výkonu při individuální kompenzaci transformátorů a asynchronních motorů lze použít tabulky.

Tab. 7-2 Individuální kompenzace trojfázových transformátorů [10]

Výkon transformátorů	Transformátory s orientovanými plechy		Transformátory s neorientovanými plechy	
	6 až 22/0,4 kV	35/0,4kV	6 až 22/0,4 kV	35/0,4kV
	Výkon kondenzátorů	Výkon kondenzátorů	Výkon kondenzátorů	Výkon kondenzátorů
kVAr	kVAr	kVAr	kVAr	kVAr
100	3	4	7	8
125	-	-	9	10
160	4	4	10	12
200	-	-	12	14
250	5	6	15	17
315	-	-	18	21
400	6	7	22	26
500	-	-	27	32
630	8	8	32	38
800	-	-	40	47
1 000	10	11	50	57
1 250	-	-	63	69
1 600	12	13	77	88
2 500	22	22	-	-
4 000	27	27	-	-
6 300	35	35	-	-
10 000	45	45	-	-

Tab.7-4 Individuální kompenzace asynchronních motorů [10]

Výkon motoru	kW	2,2	3	3,7	4	6	6	7,5	10	11	13	15	17	19	20	22
Výkon kondenzáru pro motory pod 1000 ot/min	kVAr	1	1	2	2	3	3	4	5	5	6	7	7	8	9	10
Výkon kondenzáru pro motory nad 1000 ot/min	kVAr	1	1	1	2	2	2	4	4	4	5	5	6	7	7	8

Výkon motoru	kW	25	30	33	37	40	45	50	55	63	75	80	90	100
Výkon kondenzáru pro motory pod 1000 ot/min	kVAr	11	12	13	14	15	17	18	20	22	25	27	30	33
Výkon kondenzáru pro motory nad 1000 ot/min	kVAr	9	10	11	12	12	13	15	16	17	20	21	22	24

Další možností jak určit kompenzační výkon je ze vztahu

$$Q_c = P_p \cdot k \quad [\text{VAr}; \text{W}, -] \quad (7.2)$$

kde Q_c ...je kompenzační výkon kondenzátoru

P_p ...je celkový činný příkon

k ...je konstanta pro převod nekompenzovaného účinku motoru na kompenzovaný účinník.

Tab. 7-3 Konstanta pro převod účinníku nekompensovaného zařízení [10]

Nekompensovaný účinník $\cos \varphi_i$	koeficient "k" pro		Nekompensovaný účinník $\cos \varphi_i$	koeficient "k" pro	
	$\cos = 0,95$	$\cos = 1$		$\cos = 0,95$	$\cos = 1$
0,50	1,4034	1,7321	0,81	0,3953	0,7240
0,55	1,1898	1,5185	0,82	0,3693	0,6980
0,60	1,0046	1,3333	0,83	0,3433	0,6720
0,65	0,8404	1,1691	0,84	0,3173	0,6459
0,70	0,6915	1,0202	0,85	0,2911	0,6197
0,71	0,6631	0,9918	0,86	0,2647	0,5934
0,72	0,6352	0,9639	0,87	0,2380	0,5667
0,73	0,6075	0,9362	0,88	0,2111	0,5397
0,74	0,5802	0,9089	0,89	0,1836	0,5123
0,75	0,5532	0,8819	0,90	0,1556	0,4843
0,76	0,5265	0,8552	0,91	0,1269	0,4556
0,77	0,4999	0,8286	0,92	0,0973	0,4260
0,78	0,4736	0,8023	0,93	0,0665	0,3952
0,79	0,4474	0,7761	0,94	0,0343	0,3630
0,80	0,4213	0,7500	0,95	0,0000	0,3287

7.3 Nechráněná kompenzace

Používá se v sítích s minimálně nebo mírně zatíženými harmonickými proudy a patří mezi nejčastěji používaný způsob kompenzace. Jako kompenzační zařízení se použije kondenzátor, měrné ztráty jsou max. 0,5W/kvar. Je nutno udělat kontrolu na výskyt harmonických v síti.

Důvodem kontroly na harmonické v síti je frekvenční závislost impedance kondenzátoru dána vztahem (7.3). Z té vyplývá, že impedance klesá se zvyšujícím se kmitočtem.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad [\Omega; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}] \quad (7.3)$$

Pro nechráněnou kompenzaci se používají prosté výkonové kondenzátory. Požadavky na tyto kondenzátory jsou:

1. tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu
2. odolnost proti přepětí
3. spolehlivost a bezpečnost provozu.

Nejdůležitější vlastností kondenzátorů je jejich výkon při různém způsobu zapojení. Pro výpočet velikosti výkonu kondenzátoru potřebujeme znát kapacitu kondenzátoru C [F], úhlovou rychlost ω [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] a efektivní hodnoty proudu I [A] a napětí U [V]. Pro třífázová zapojení vycházíme z předpokladu, že kondenzátory jsou symetrické.

1. Pro jednofázový kondenzátor platí:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad [\text{VAr}; \text{V}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}] \quad (7.4)$$

$$Q_C = U \cdot I \quad [\text{VAr}; \text{V}, \text{A}] \quad (7.5)$$

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{VAr}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}] \quad (7.6)$$

2. Pro trojfázový kondenzátor zapojený do trojúhelníku platí:

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_D \quad [\text{VAr}; \text{V}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}] \quad (7.7)$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{VAr}; \text{V}, \text{A}] \quad (7.8)$$

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} \quad [\text{VAr}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}] \quad (7.9)$$

3. Pro trojfázový kondenzátor zapojený do hvězdy platí:

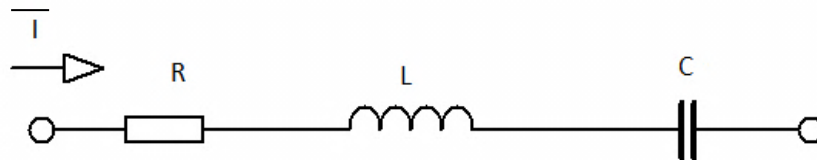
$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_Y \quad [\text{VAr}; \text{V}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}] \quad (7.10)$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{VAr}; \text{V}, \text{A}] \quad (7.11)$$

$$Q_C = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y} \quad [\text{VAr}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}] \quad (7.12)$$

7.4 Chráněná kompenzace

Základním prvkem je sériový RLC obvod, který se skládá z kondenzátoru, tlumivky a odporu. U sériového zapojení RLC může nastat na takzvaném rezonančním kmitočtu f_r rezonance kdy je impedance obvodu minimální. Další důležitou frekvencí je jmenovitý pracovní kmitočet f_n .



Obr. 7-1 Jednoduchý sériový RLC článek

Pomocné veličiny pro sériový RLC článek:

řád harmonické n , kdy rezonance nastává při:

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} [-; \text{Hz}] \quad (7.13)$$

Činitel zatlumení:

$$p = \frac{1}{n_f^2} [-] \quad (7.14)$$

Činitel zatlumení p se udává buď jako bezrozměrné číslo, ale může být i v procentech.

Pokud je splněna podmínka $X_L \ll X_C$ tak se aplikují ochranné tlumivky:

$$X_L = -p \cdot X_C [\Omega; -, \Omega] \quad (7.15)$$

Při návrhu je jedno jestli jsou kompenzační kondenzátory zapojeny do hvězdy nebo trojúhelníku, ale je výhodnější vycházet z fázové hodnoty napětí a tedy fázové reaktance kondenzátorů (X_{CN}) a fázové reaktance tlumivek (X_{LN}).

Reaktance kompenzačního článku X_{LC} je při $f < f_r$ menší než výchozí reaktance kondenzátoru a určí se.

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C [\Omega; -, \Omega] \quad (7.16)$$

V praxi se kompenzační kondenzátory navrhují v sítích čtyři sta voltů na kmitočet sítě $f_n = 50 \text{ Hz}$ a napětí na kondenzátoru $U_{CN} = 440 \text{ V}$ z důvodů zvýšení napětí předřadnými tlumivkami.

Hodnotu reaktance určíme:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} [\Omega; \text{V, var}] \quad (7.17)$$

Výkon kondenzátoru při jiném fázovém napětí:

$$Q_C = \frac{3 \cdot U_F^2}{X_C} [\text{var; V, } \Omega] \quad (7.18)$$

7.5 Kompenzační filtry

Kompenzační filtry slouží k filtraci harmonických a současně ke kompenzaci jalový výkonu. Kompenzační filtr je naladěn na rezonanční kmitočet ω_r , pro který představuje zkrat a tak je tento kmitočet odsáván ze sítě. Pro kmitočty menší než rezonanční představuje kondenzátor a pro kmitočty vyšší se chová jako tlumivka. Používají se tam, kde je velmi velký výskyt harmonických signálů. V praxi se používá několik takových filtrů naladěných na různé harmonické. Schéma obvodu stejné jako u hrazené kompenzace (obr. 7-1).

Impedance obvodu je dána vztahem

$$Z = R + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) [\Omega; \Omega, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{H, F}] \quad (7.19)$$

Pokud uvažuje i odpor R , pak obvodem prochází proud závislý na frekvenci

$$I = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot L}{R} - \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \right)^2}} [\text{A; V, } \Omega, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{H, F}] \quad (7.20)$$

Při rezonanci kdy $\omega = \omega_r$, tak bude obvodem RLC protékat jen činný proud I_R toto vyplývá z rovnice (7.20) protože výraz pod odmocninou bude roven jedné.

Potom je velikost proudu při rezonanci:

$$I_R = \frac{U}{R} \quad [\text{A}; \text{V}, \Omega] \quad (7.21)$$

Činitel jakosti obvodu je Q a udává šířku rezonanční pásma.

$$Q = \frac{\omega_r \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_r \cdot R \cdot C} \quad [-; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{H}, \Omega, \text{F}] \quad (7.22)$$

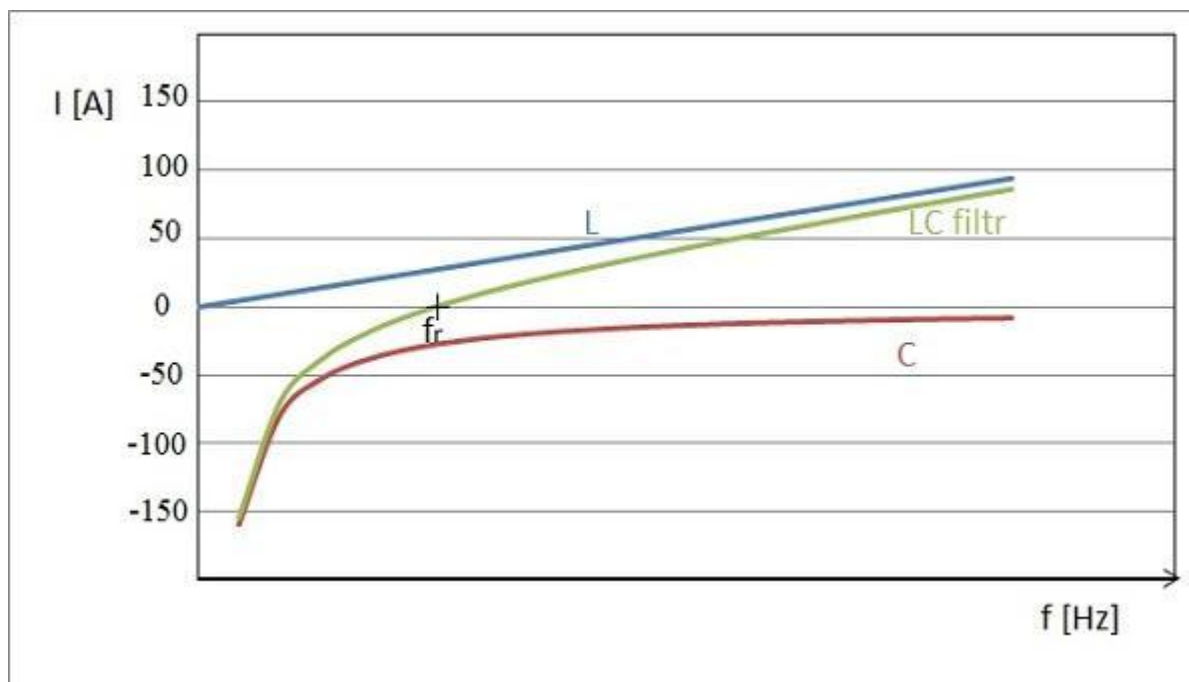
Po úpravě předchozích vztahů dostaneme vztah:

$$\frac{I}{I_R} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right)^2 \cdot Q^2}} \quad [\text{A}; \text{V}, \Omega, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, -] \quad (7.23)$$

Činitel rozladění:

$$F = \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \quad [-; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.24)$$

Kmitočtové závislost LC obvodu jsou charakterizovány kmitočty kdy $\frac{I}{I_R} < \frac{1}{\sqrt{2}}$ tato situace nastane za podmínky $F \cdot Q = \pm 1$.



Obr. 7-2 Kmitočtové charakteristiky L , C a LC filtru [1]

8 KOMPENZAČNÍ KOMPONENTY

8.1 Kondenzátory

Kompenzační kondenzátory patří mezi základní součást kompenzačních zařízení.

NN kondenzátory

Kondenzátory jsou realizovány hlavně pomocí technologie MKP, jež je založena na pokovení polypropylenové fólie směsí Zn-Al ve vakuu takto vytvořené dielektrikum má malé ztráty je samoregenerační a v suchém provedení. Svitky jsou zality v pevné kompaktní hmotě a umístěn do hliníkového pouzdra válcovitého nebo hranatého tvaru. Kondenzátory bývají opatřeny přetlakovou pojistkou a vybíjecími odpory, které zaručí pokles napětí na 50 V střídavých do jedné minuty. Takto konstruované kondenzátory jsou ekologicky nezávadné.

Samoregenerace - Během přetížení vznikají elektrické oblouky, které odpaří pokovenou vrstvu v místě poruchy. Tlak takto vzniklého plynu během několika mikrosekund odstraní odpařené pokovení. Tak vznikne v místě poruchy nevodivá a napětově odolná oblast. Kapacita kondenzátoru se sníží o 100 pF tzn. funkčnost a výkon kondenzátoru zůstane zachována.

Přetlaková pojistka – Principem je, že plyn vytvořený při regeneraci se hromadí a může dojít k výbuchu kondenzátoru. Tomu zabrání přetlaková pojistka, která v případě rostoucího tlaku odtrhne víko kondenzátoru.

Konstrukce VN kondenzátorů

Kondenzátory jsou vyráběny technologií all-film kde dielektrikum tvoří polypropylenová fólie impregnovaná syntetickou kapalinou JERYLEC, která je zdravotně i ekologicky nezávadná. Elektrody jsou tvořeny hliníkovou folií. Vyrábějí se zcela izolované v trojfázové i jednofázové variantě.

Provozní podmínky – Pro kondenzátory NN tak VN musí být dodrženy určené podmínky.

Nedoporučuje se je umísťovat blízko zdrojů tepla (Tlumivky), protože ohřev kondenzátoru zkracuje jeho životnost. Stejně tak nadproudy a harmonické proudy. Umístění a natočení kondenzátorů stejně jako upevnění a další parametry uvádí výrobce v katalogu.

8.2 Tlumivky

Tlumivky určené pro kompenzaci jalového výkonu se vyrábějí s vysokou linearitou, malou hlučností a nízkými ztrátami. Používají se pro omezení amplitudy proudových rázů při spínání, omezení rezonančních jevů, zabránění odsávání kmitočtu HDO ze sítě a pro realizaci kompenzačních filtrů.

Realizují se jako třífázové se společným feromagnetickým jádrem se vzduchovou mezerou. Připojení může být realizováno přes přípojnice, svorkovnice anebo kabelem. Většina tlumivek je vybavena teplotním čidlem, které je při překročení nastavené teploty odpojí. Tlumivky mají izolační stabilitu do 135°C. Ztráty jsou mezi 4-6 W/kVAr. Obvykle se vyrábějí s činitelem ztlumení 7 % nebo 14 % ale je možný i jiný. Tlumivky určené pro filtraci se standardně nevyrábějí.

8.3 Regulátory

Regulátory se používají ke spínání stupňovité kompenzace nebo ovládání bezkontaktní kompenzace. Regulátor snímá stav sítě a podle potřeby spíná kondenzátory k dosažení stanovaného účinníku. Data jsou snímána pomocí měřících transformátorů, případně je regulátor snímá přímo přes připojení k napájení a poté jsou převedena pomocí A/D převodníku. Pro výpočet proudu a napětí se používá algoritmus FFT (rychlá Fourierova transformace).

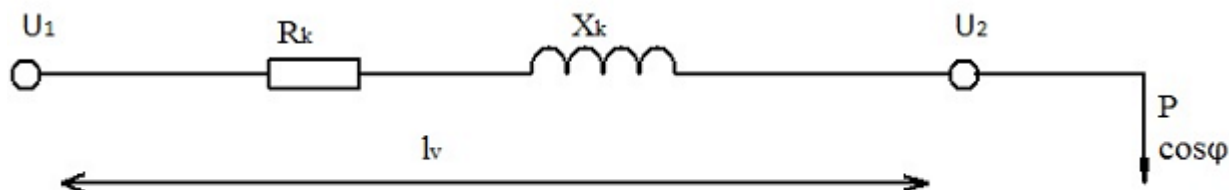
Ovládání je automatické nebo manuální. Většina regulátorů zvládá zobrazovat naměřené hodnoty proudu a napětí, zkreslení signálu a obsah harmonických, činný a jalový výkon, počet sepnutí kompenzačních stupňů.

Z důvodů životnosti kompenzačních zařízení je lepší opatřit regulátor, který prve spíná polovodičové kompenzační stupně a poté stupně ovládané pomocí stykačů. Při použití stykačových stupňů využívá kruhového spínání. Spíná kondenzátory o stejném výkonovém stupni, které byly nejdéle neaktivní kvůli rovnoměrnému rozložení zatížení.

9 PŘÍKLAD

V průmyslovém podniku byl instalován asynchronního motoru o výkonu $P=10 \text{ kW}$ zapojený do trojúhelníku a maximálních otáčkách $n=3000 \text{ min}^{-1}$ s $\cos\varphi=0,75$ a připojeném na napětí $U=400 \text{ V}$. Je připojen na rozvaděč vzdálený $l_v=500\text{m}$ a parametry vedení jsou reaktance $X_k=0,32 \text{ } \Omega/\text{km}$ a rezistence $R_k=0,16 \text{ } \Omega/\text{km}$. Navrhněte velikost potřebného kompenzačního výkonu pro dosažení účinníku $\cos\varphi=0,95$ a velikost kompenzačního kondenzátoru

Schéma:



Řešení:

$$R = R_k \cdot l_v = 0,16 \cdot 0,5 = 0,08 \text{ } \Omega$$

$$X = X_k \cdot l_v = 0,32 \cdot 0,5 = 0,16 \text{ } \Omega$$

Stav před kompenzací:

Odebíraný jalový výkon:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}\varphi = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos\varphi)) = 10 \cdot 10^3 \cdot \operatorname{g}(\arccos(0,75)) = 8819,17 \text{ VAR}$$

Výkonové ztráty dle vztahu (2.9) kde proud je vyjádřen pomocí výkonu:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot \left(\left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 + \left(\frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \right) = 3 \cdot 0,08 \cdot \left(\left(\frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} \right)^2 + \left(\frac{8819,17}{\sqrt{3} \cdot 400} \right)^2 \right) = 88,9 \text{ W}$$

Úbytek napětí dle vztahu (2.10) kde proud je vyjádřen pomocí výkonu:

$$\Delta U \cong R \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} + X \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} = 0,08 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} + 0,16 \cdot \frac{8819,17}{\sqrt{3} \cdot 400} = 3,19 \text{ V}$$

Výpočet kompenzátoru:

Pro určení velikosti kompenzačního výkonu použijeme následující postupy.

- 1) Potřebný kompenzační výkon určíme ze vztahu (7.1)

$$Q_C = P \cdot (tg\varphi - tg\varphi_K) = P \cdot (tg(\arccos(\cos\varphi)) - tg(\arccos(\cos\varphi_K))) = \\ = 10 \cdot 10^3 \cdot (tg(\arccos(0,75)) - tg(\arccos(0,95))) = 5532,33 \text{ VAr}$$

Určení kondenzátoru ze vztahu (7.7)

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_D \Rightarrow C_D = \frac{Q_C}{3 \cdot U^2 \cdot \omega} = \frac{5532}{3 \cdot 400^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 36,687 \mu\text{F}$$

- 2) Určení kompenzačního výkonu dle vztahu (7.2) a tabulky (7.3)

Z tabulky (7.3) pro $\cos\varphi=0,75$ určíme $k=0,5532$.

$$Q_C = P_p \cdot k = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,5532 = 5532 \text{ VAr}$$

Určení kondenzátoru ze vztahu (7.7)

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_D \Rightarrow C_D = \frac{Q_C}{3 \cdot U^2 \cdot \omega} = \frac{5532}{3 \cdot 400^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 36,685 \mu\text{F}$$

- 3) Určení velikosti potřebného kondenzátoru z tabulky (7.4)

Pro $P=10 \text{ kW}$ je velikost potřebného kompenzačního $Q_C=4 \text{ kVAr}$.

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_D \Rightarrow C_D = \frac{Q_C}{3 \cdot U^2 \cdot \omega} = \frac{4000}{3 \cdot 400^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 26,526 \mu\text{F}$$

Pro první a druhou metodu vyšla potřebná velikost kompenzačního výkonu zaokrouhleně $5,5 \text{ kVAr}$ kondenzátory o této velikosti se normálně nevyrábí a proto zvolíme nejbližší vyšší kondenzátory a to o výkonu $6,25 \text{ kVAr}$. Pro poslední metodu vyšel kompenzační výkon 4 kVAr a opět zvolíme katalogovou hodnotu $4,17 \text{ kVAr}$.

Pro kompenzaci zvolíme válcovité kondenzátory dle tabulky (9.1). Kompenzačnímu výkonu $Q_C=6,25 \text{ kVAr}$ odpovídá kapacita kondenzátoru $3x42\mu\text{F}$ a výkonu $4,17 \text{ kVAr}$ odpovídá kapacita kondenzátoru $3x19,5 \mu\text{F}$.

Tab. 9-1 Kompenzační kondenzátory válcové [9]

Kapacita	Váha	Napětí [V]	230	380	400	415	440	230	380	400	440
[μF]	[kg]	frekvence [Hz]	50				60				
		rozměr [mm]	kompenzační výkon [kVAr]								
3 x 6,7	0,4	50 x 176			1,00						
3 x 9,6	0,4	50 x 176			1,50		1,75				
3 x 14	0,4	50 x 176			2,00		2,50				
3 x 17	0,4	50 x 176	0,83		2,50		3,12	1,00		3,12	3,75
3 x 19,5	0,4	50 x 176			3,00		4,17				
3 x 28	0,5	60 x 176			4,17		5,00				
3 x 34	0,6	65 x 176	1,67		5,00		6,25	2,00		6,25	7,50
3 x 42	0,9	75 x 176			6,25		7,50			7,50	
3 x 50	0,9	75 x 176	2,50		7,50			3,00			
3 x 57	0,9	85 x 176			8,30		10,00				
3 x 68	1	75 x 230			10,00		12,50			12,50	15,00
3 x 82	1,3	85 x 230			12,50	13,30	15,00		13,30	15,00	
3 x 100	1,5	95 x 230			15,00	16,60			16,60		22,50
3 x 111	1,5	95 x 230			16,60		20,00			20,00	25,00
3 x 137	1,7	100 x 230			20,00		25,00			25,00	30,00
3 x 166	2,1	116 x 230			25,00		30,00			30,00	
3 x 199	2,6	116 x 230			30,00						

Stav po kompenzaci:**Pro 1. a 2. Metodu:**

Jako kompenzační výkon použijeme výkon dodaný zvolenými kondenzátory.

Odebíraný jalový výkon:

$$Q_k = Q - Q_C = 8819,17 - 6250 = 2569,17 \text{ VAr}$$

Výkonové ztráty dle vztahu (2.9) kde proud je vyjádřen pomocí výkonu:

$$\Delta P_1 = 3 \cdot R \cdot \left(\left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 + \left(\frac{Q_k}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \right) = 3 \cdot 0,08 \cdot \left(\left(\frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} \right)^2 + \left(\frac{2569,17}{\sqrt{3} \cdot 400} \right)^2 \right) = 53,3 \text{ W}$$

Úbytek napětí dle vztahu (2.10) kde proud je vyjádřen pomocí výkonu:

$$\Delta U_1 \cong R \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} + X \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} = 0,08 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} + 0,16 \cdot \frac{2569,17}{\sqrt{3} \cdot 400} = 0,69 \text{ V}$$

Pro 3. Metodu:

Jako kompenzační výkon použijeme výkon dodaný zvolenými kondenzátory.

Odebíraný jalový výkon:

$$Q_k = Q - Q_c = 8819,17 - 4170 = 4649,2 \text{ VAr}$$

Výkonové ztráty dle vztahu (2.9) kde proud je vyjádřen pomocí výkonu:

$$\Delta P_2 = 3 \cdot R \cdot \left(\left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 + \left(\frac{Q_k}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \right) = 3 \cdot 0,08 \cdot \left(\left(\frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} \right)^2 + \left(\frac{4649,2}{\sqrt{3} \cdot 400} \right)^2 \right) = 60,8 \text{ W}$$

Úbytek napětí dle vztahu (2.10) kde proud je vyjádřen pomocí výkonu:

$$\Delta U_2 \cong R \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} + X \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} = 0,08 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} + 0,16 \cdot \frac{8819,17}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1,24 \text{ V}$$

Zhodnocení:

Změna výkonových ztrát pro metodu jedna a dva:

$$\begin{aligned} \Delta P_{1\%} &= \frac{\Delta P - \Delta P_1}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{88,9 - 53,3}{88,9} \cdot 100 = 40,4 \% \\ \Delta U_{1\%} &= \frac{\Delta U - \Delta U_1}{\Delta U} \cdot 100 = \frac{3,19 - 0,69}{3,19} \cdot 100 = 78,37 \% \\ \cos \varphi &= \cos \left(\arctg \left(\frac{Q_k}{P} \right) \right) = \cos \left(\arctg \left(\frac{2569,17}{10 \cdot 10^3} \right) \right) = 0,966 \end{aligned}$$

Změna výkonových ztrát pro metodu tři:

$$\begin{aligned} \Delta P_{2\%} &= \frac{\Delta P - \Delta P_2}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{88,9 - 60,8}{88,9} \cdot 100 = 31,6 \% \\ \Delta U_{2\%} &= \frac{\Delta U - \Delta U_2}{\Delta U} \cdot 100 = \frac{3,19 - 1,24}{3,19} \cdot 100 = 61,24 \% \\ \cos \varphi &= \cos \left(\arctg \left(\frac{Q_k}{P} \right) \right) = \cos \left(\arctg \left(\frac{4649,2}{10 \cdot 10^3} \right) \right) = 0,906 \end{aligned}$$

10 NÁVRH KOMPENZACE PRO PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE

Praktická část se zabývá návrhem kompenzace pro průmyslový podnik zadání dodáno firmou Kompel. V první části je vypočteno zpoplatnění za nedodržení účinníku dle platné legislativy. V následující části je proveden návrh kompenzačního zařízení, jenž vychází z výpisu elektroměru odběratele a provedených měření v síti. Poslední podkapitola se zabývá finanční náročností investice a její návratnosti.

Zadání:

Areál průmyslového podniku je napájen z distribučního transformátoru 22 kV/ 0,4 kV o výkonu 160 kVA. V podniku není realizován žádný jiný způsob kompenzace jalového výkonu, kromě kompenzace ztrát transformátoru. Navrhněte kompenzační zařízení podle dat z elektroměru a měření sítě průmyslového podniku.

10.1 Zpoplatnění za nedodržení účinníku

Pro výpočet zpoplatnění za nedodržení účinníku se vyjde z vyhlášky Energetického regulačního úřadu týkající se cenové rozhodnutí ERÚ [5] a záznamu z elektroměru za tři měsíce. Odběratel je kategorie B s čtvrt hodinovým snímáním okamžitých hodnot činného a jalového výkonu a taktéž dodávaného jalového výkonu.

Nejprve se vypočte celková odebraná energie za jednotlivé měsíce a to jak jalová tak činná. Z těchto energií se stanoví účinník podle, kterého se bude účtovat přírážka za nedodržení účinníku.

Celkovou odebranou energií vypočteme dle

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{4} \text{ [Wh; W]} \quad (10.1)$$

kde E je celková odebraná energie, P_i je změřený okamžitý odebíraný výkon ve čtvrt hodinovém intervalu. V tabulce 10.1 jsou uvedeny odběry činné a jalové energie, dosažené hodnoty účinníků a jim odpovídající cenová přírážka dle rozhodnutí ERÚ [5], dále je uveden maximální naměřený odebíraný výkon.

Tab. 10-1 Tabulka odebrané energie, účinníku, měsíční přírážky a max. výkonu pro jednotlivé měsíce

Období	Činná E. [MWh]	Jalová E. [MVArh]	účinník tg	účinník cos	přírážka [%]	P_{max} [kW]
Prosinec 2012	10,544	8,333	0,790	0,785	28,07	54
Leden 2013	7,513	4,745	0,631	0,846	12,38	53
Únor 2013	8,375	6,483	0,774	0,791	28,07	58

Z hodnot uvedených v tabulce 10.1 se vypočte pokuta za nedodržení účinníku dle vzorce

$$N = P_{max} \cdot RK \cdot \frac{PR}{100} + (PNH + PCS) \cdot \frac{PR}{100} \cdot E_{\varepsilon} \text{ [Kč; MW, } \frac{\text{Kč}}{\text{MWh}}, -, \text{ MWh]} \quad (10.2)$$

kde N je výsledná cena za nedodržení účinníku, P_{max} je maximální naměřený odebíraný výkon, RK cena za rezervovanou kapacitu na příslušné napěťové hladině, PNH cena za použití sítě na příslušné napěťové hladině, PCS je pevná cena silové elektřiny pro vyhodnocení cenové přírážky za nedodržení účinníku, PR výška přírážky v procentech, E_{ε} odebraná činná energie. Cenu jednotlivých položek určuje ERÚ. V následujících tabulkách jsou červeně označeny hodnoty, z nichž se vypočte velikost pokuty.

Tab. 10-2 Ceny za rezervovanou kapacitu dle cenového rozhodnutí ERÚ [5]

Provozovatel distribuční soustavy	Úroveň napětí	Měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu v Kč/MW a měsíc	Měsíční cena za měsíční rezervovanou kapacitu v Kč/MW a měsíc
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	50 409	59 871
	VN	116 982	138 940
PREdisribuce, a.s.	VVN	67 711	74 402
	VN	165 133	181 451
ČEZ Distribuce, a.s.	VVN	66 973	74 685
	VN	160 677	179 278
SV servisní, s.r.o	VN	155 325	169 805

Tab. 10-3 Cena za použití sítí VVN a VN dle cenového rozhodnutí ERÚ [5]

Provozovatel distribuční soustavy	Úroveň napětí	Cena za použití sítí VVN a VN v Kč/MWh
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	60,80
	VN	94,69
PREdisribuce, a.s.	VVN	51,47
	VN	75,13
ČEZ Distribuce, a.s.	VVN	40,29
	VN	74,52
SV servisní, s.r.o	VN	105,60

Tab. 10-4 Cena silové elektřiny při nedodržení účinníku podle cenového rozhodnutí ERÚ [5]

Provozovatel distribuční soustavy	Pevná cena silové elektřiny v Kč/MWh pro vyhodnocení cenové přírážky za nedodržení smluvené hodnoty účinníku
ČEZ Distribuce, a.s.	1543,45
E.ON Distribuce, a.s.	1588,3
PREdisribuce, a.s.	1598,15

Pro měsíc Únor je výše pokuty:

$$N = P_{max} \cdot RK \cdot \frac{PR}{100} + (PNH + PCS) \cdot \frac{PR}{100} \cdot E_{\check{c}} =$$

$$= 0,058 \cdot 116982 \cdot \frac{28,07}{100} + (94,69 + 1588,3) \cdot \frac{28,07}{100} \cdot 8,375 = 5861,02 \text{ Kč}$$

Pro ostatní měsíce je systém výpočtu stejný a výše pokuty je uvedena v tabulce (10-5), kde je navíc uvedena průměrná výše pokuty.

Tab. 10-5 Pokuta za nedodržení účinníku za jednotlivé měsíce

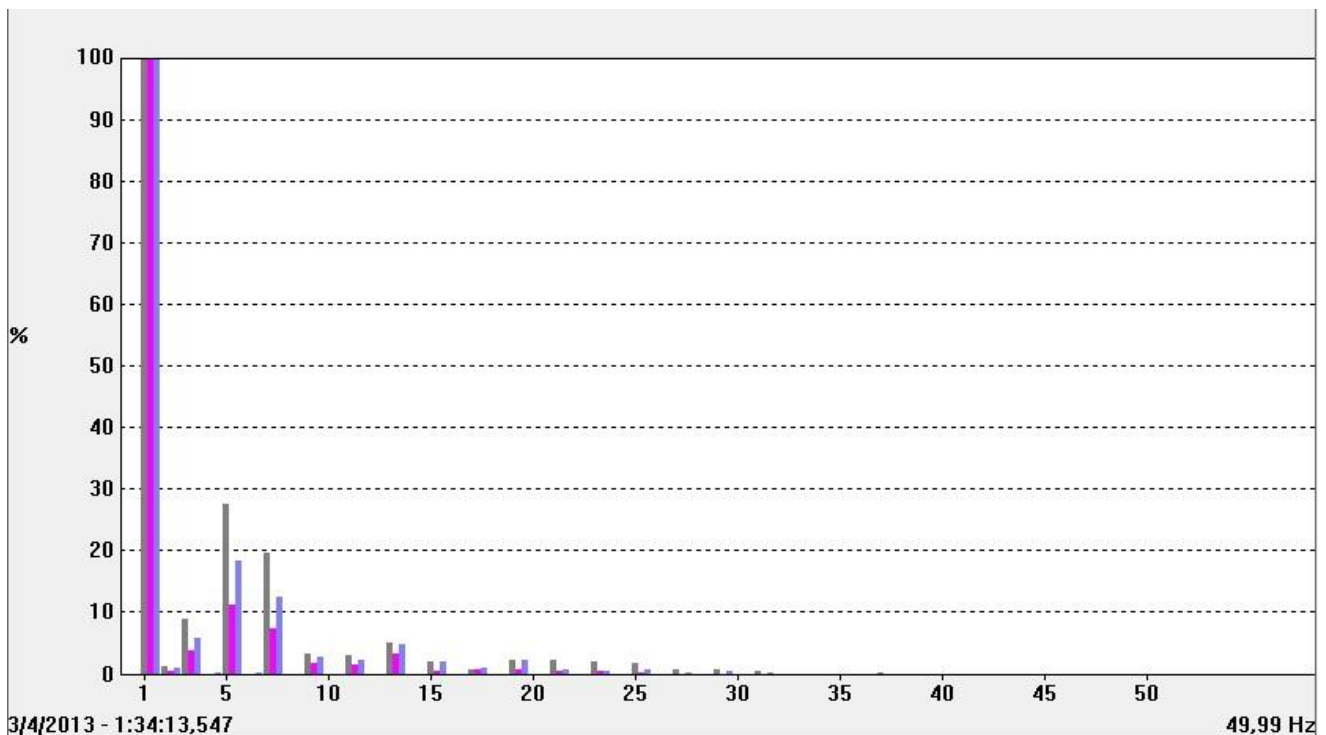
Období	Prosinec	Leden	Únor	Průměr
Pokuta za účinník [Kč]	6757,17	2405,34	5861,02	5007,84

10.2 Návrh kompenzátoru

Pro návrh kompenzátoru se vyjde z maximálního a minimálního kompenzačního výkonu a parametrů sítě tj. obsahu harmonických napětí a proudů.

HARMONICKÉ PROUDY A NAPĚTÍ

Tato část je zaměřena na zjištění obsahu harmonických proudů a napětí v síti, jejich velikost a vliv na kompenzační zařízení. Podle výsledků se rozhodne, jestli bude použita hrazená nebo nehrazená kompenzace. Vyjde se jak z naměřených údajů, tak z metodiky uvedené v kapitole 7.

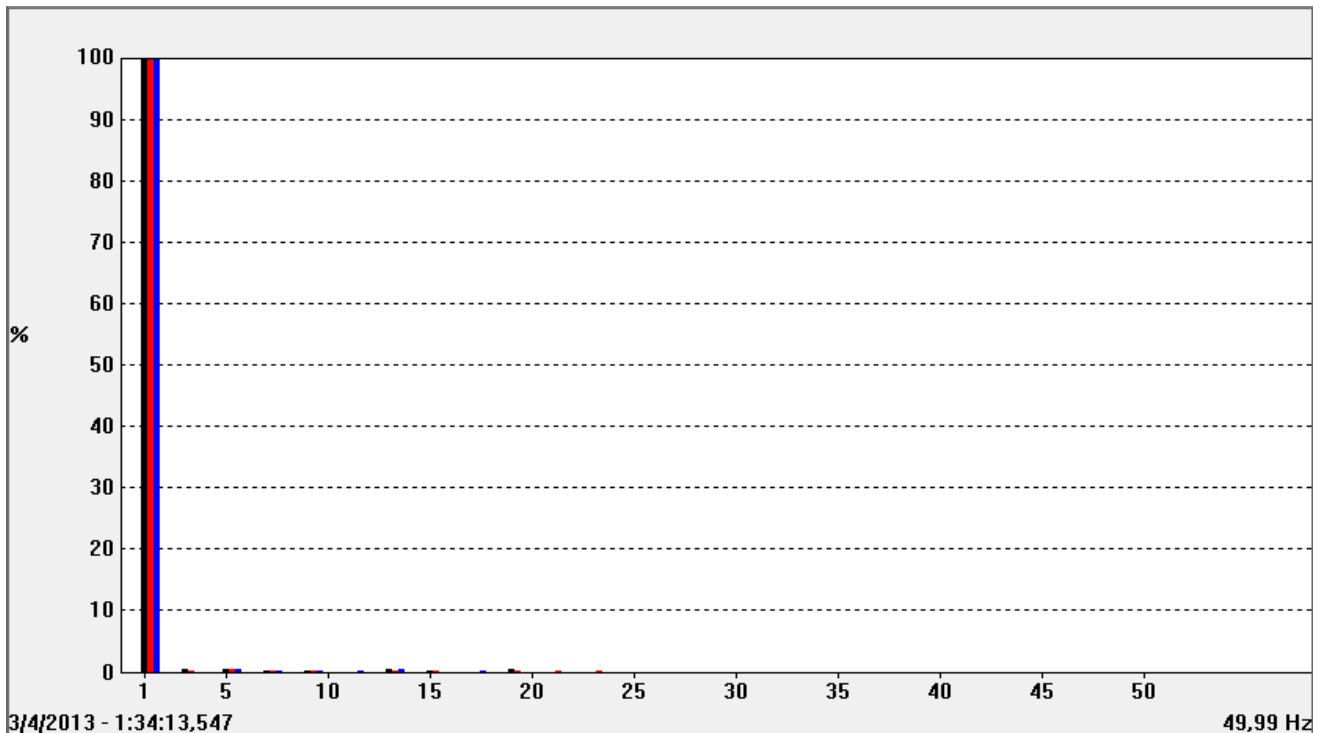


Obr. 10-1 Harmonické proudy

Jak je vidět na Obr. 10.1 tak se v síti vyskytuje velmi málo harmonických proudů. Jelikož se harmonické proudy šíří od zdroje a vyvolávají na impedancích úbytky napětí, které poté přetěžují kondenzátory tak v případě měření harmonických napětí je vidět na Obr 10.2, že se v síti vyskytuje jenom velmi nevýrazná pátá harmonická. Dále jsou v tabulce 10.6 uvedena celková harmonická zkreslení proudu THD(i), napětí THD(u) a zdánlivý výkon, podle kterého vyjde z porovnávacích výpočtů uvedených v kapitole 7.1, že síť je minimálně zatížena harmonickými, jelikož výsledný porovnávací výpočet je menší jak 5%. Z těchto důvodů bude kompenzační zařízení nehrazené.

Tab. 10-6 Harmonické proudy, napětí a charakter sítě

Fáze	THD(i)	THD(u)	S	THD(i)*(S/Sn)
-	[%]	[%]	[VA]	[%]
1	32,7	0,8	6027	1,23
2	14,5	0,7	12129	1,10
3	24,1	0,7	7549	1,14



Obr. 10-2 Harmonická napětí

KOMPENZAČNÍ VÝKON

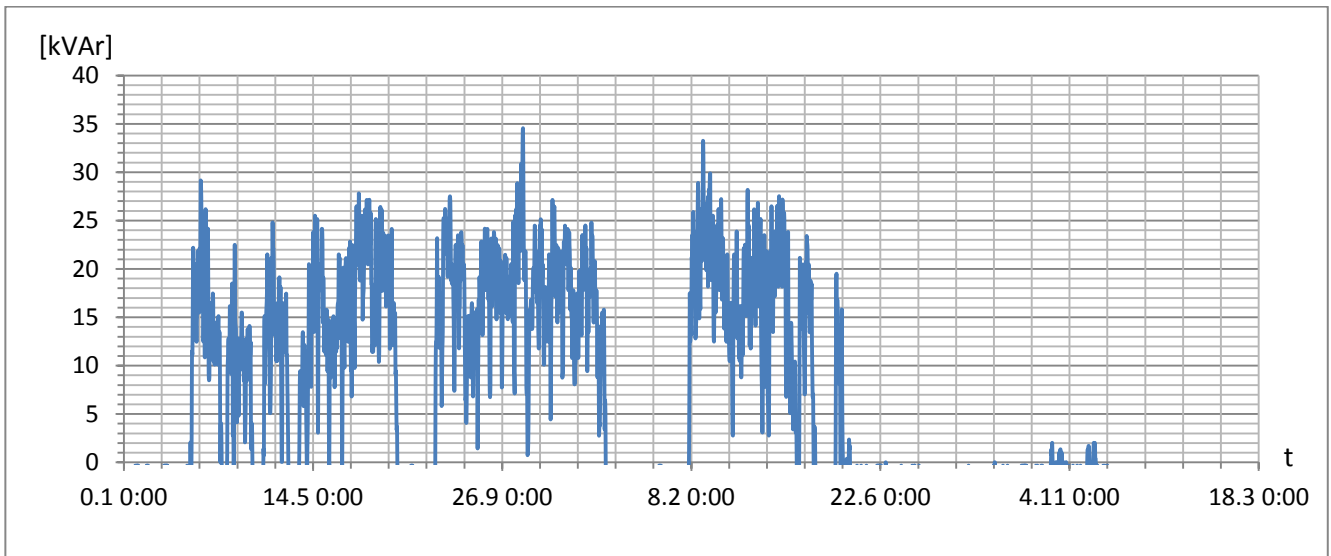
Pro stanovení kompenzačního výkonu se vyjde ze záznamu z elektroměru. Z naměřených hodnot činného a jalového výkon se vypočte odpovídající účinník dle vzorce (2.11).

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{W} [-; \text{Wh, varh}]$$

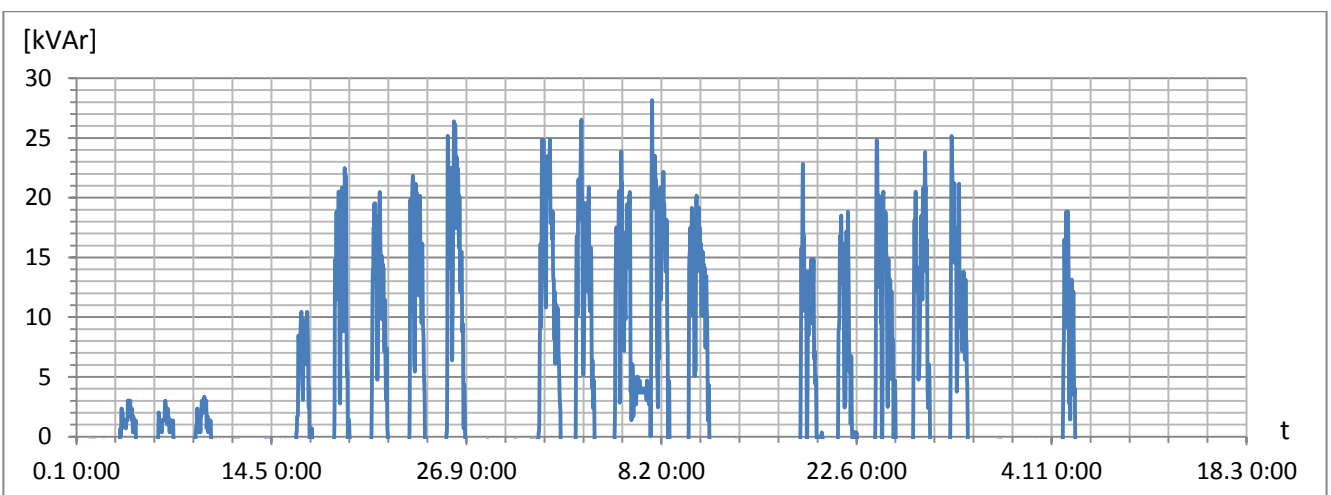
Potřebný kompenzační výkon se stanoví pro účinník $\cos \varphi = 0,95$ dle vzorce (7.1).

$$Q_C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K) [\text{VAR}; \text{W}, -]$$

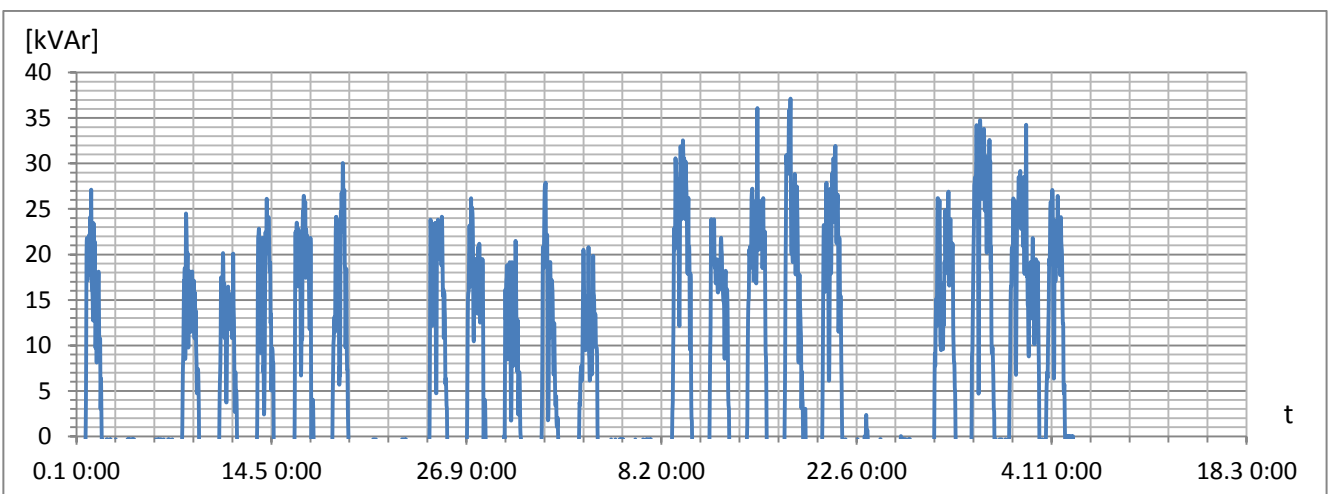
Pro jednotlivé měsíce se sestaví graf závislosti potřebného kompenzačního výkonu na čase. Z celého sledované se vybere minimální kompenzační výkon a maximální kompenzační výkon. Z minimálního kompenzačního výkonu se určí nejmenší potřebný kompenzační výkon a z maximálního se určí nejmenší potřebná velikost kompenzačního zařízení. Dále se z průběhu může stanovit velikost kompenzačního stupně, ale obvykle se volí, aby následující stupeň byl dvojnásobkem předešlého.



Obr. 10-3 Potřebný kompenzační výkon pro $\cos\varphi=0,95$ za období Prosinec 2012



Obr. 10-4 Potřebný kompenzační výkon pro $\cos\varphi=0,9$ za období Leden 2013



Obr. 10-5 Potřebný kompenzační výkon ($\cos\varphi=0,95$) za období Únor 2013

Z dat za jednotlivá období vyplývá, že největší kompenzační výkon je 37 kVAr v Únoru 2013 a nejmenší kompenzační výkon je 1 kVAr, jenž se objevuje v každém období. Pro návrh kompenzace se vyjde z nejmenšího potřebného kompenzačního výkonu a potřebný celkový kompenzační výkon se navýší oproti maximálnímu z důvodů rezervy v případě připojení dalších spotřebičů.

Tab. 10-7 Min. a max. kompenzační výkon

Změřené		Stanovené	
MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]
1	37	1,5	50

Jako kompenzátory se použijí válcové kondenzátory pro nízká napětí od výrobce ZEZ SILKO. Z katalogu výrobce ZEZ SILKO [10] se vyberou kondenzátory pro jednotlivé stupně tak aby splnily podmínku, že následující stupeň bude dvojnásobkem předešlého a celkový kompenzační výkon se blížil stanovenému kompenzačnímu výkonu 50 kVAr.

Tab. 10-8 Rozdělení kompenzačních výkonů do stupňů

Stupeň	-	1.	2.	3.	4.	5.	Celkem
Kompenzační výkon	[kVAr]	1,5	3,15	6,25	12,5	25	48,4

Tab. 10-9 Zvolené kondenzátory

Kondenzátory ZEZ SILKO						
Typ	Výkon [kVAr]	Proud [A]	Kapacita [μ F]	Rozměr [mm]	Hmotnost [kg]	Stupeň krytí
CSADG1-0,4/1,5	1,5	2,2	3x9,9	85x175	0,6	IP20
CSADG1-0,4/3,15	3,15	4,5	3x20,9	85x175	0,7	IP20
CSADG1-0,4/6,25	6,25	9	3x41,4	85x175	1	IP20
CSADG1-0,4/12,5	12,5	18	3x82,9	85x245	1,2	IP20
CSADG1-0,4/25	25	36,1	3x165,8	110x245	2,1	IP20

STYKAČE

Použijí se stykače s odporovým spínáním Benedict. Stykače se vyberou z katalogu ZEZ SILKKO [10] podle velikosti spínaného výkonu jednotlivých stupňů a jmenovitého proudu kondenzátorových baterií.

Tab. 10-10 Zvolené stykače typ K3 Benedict

Stupeň	Stykač	
-	Typ	I_m
-	-	[A]
1.	K3-18K10 230	18
2.	K3-18K10 230	18
3.	K3-18K10 230	18
4.	K3-18K10 230	18
5.	K3-32K00 230	36

JIŠTĚNÍ

Kompenzační zařízení se jistí pojistkami, velikost jejich jmenovitého proudu se volí dle násobku jmenovitého proudu kompenzačního kondenzátoru nebo dle použitých stykačů. Kompenzační kondenzátory se doporučuje jisti pojistkami s pomalou vypínací charakteristikou (gG). Proud pojistkou se obvykle volí 1,6-2,5 násobku jmenovitého proudu, také se může využít doporučených velikostí proudů pojistek dle katalogu ZEZ SILKO [10]. V tomto případě byly pojistky zvoleny dle následující tabulky 10.11. Kde I_{np} je minimální jmenovitý proud pojistky.

$$I_{np} = 1,6 \cdot I_m = 1,6 \cdot 2,2 = 3,52 \text{ A}$$

Tab. 10-11 Zvolené pojistky

Stupeň		Pojistka		
-	I_m	I_{np}	Typ	I_n
-	[A]	[A]	-	[A]
1.	2,2	3,52	NH 000 4A gG 400V	4
2.	4,5	7,2	NH 000 10A gG 400V	10
3.	9	14,4	NH 000 16A gG 400V	16
4.	18	28,8	NH 000 32A gG 400V	32
5.	36,1	57,76	NH 000 63A gG 400V	63

VODIČE

Kompenzátor se ke stávající instalaci připojí kabelem, jehož délka má být 5 m. Pro návrh přívodního kabelu se vyjde z postupu a hodnot uvedených v literatuře Rozvodná zařízení [11].

Parametry: $l=5\text{m}$, $Q=50\text{kVAr}$, $U=400\text{V}$, $t_0=30^\circ\text{C}$, na vzduchu

Jmenovitý proud:

$$I = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{50\,000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72,16 \text{ A}$$

Jelikož je teplota okolí $t_0=30^\circ\text{C}$ a kabel bude uložen na vzduchu, referenční uložení E není potřeba upravovat zatížení vodiče. Jako vodič se zvolí kabel CYKY a dle tabulky z literatury Rozvodná zařízení [11] vyjde, že vodič by měl být CYKY $4 \times 25\text{mm}^2$.

Z parametrů transformátoru se vypočte rázový zkratový proud a z něj ekvivalentní oteplovací proud.

Parametry: $S = 160 \text{ kVAr}$; $u_k = 6,2 \%$; $c = 1,1$; $k_c = 1,03$, $t = 0,2 \text{ s}$

Zkratová impedance:

$$Z_t = u_k \cdot \frac{U^2}{S} = 0,062 \cdot \frac{400^2}{160000} = 0,062 \text{ } \Omega$$

Rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_t} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,062} = 4,097 \text{ kA}$$

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' = 1,03 \cdot 4097 = 4,220 \text{ kA}$$

Kontrola na tepelné účinky zkratových proudů:

$$S_{min} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\frac{c \cdot (\vartheta_f + 20)}{\rho} \cdot \ln\left(\frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_z}\right)}} = \frac{4220 \cdot \sqrt{0,2}}{\sqrt{\frac{3,5 \cdot (234,5 + 20)}{0,01786} \cdot \ln\left(\frac{234,5 + 150}{234,5 + 70}\right)}} = 17,5 \text{ mm}^2$$

Minimální průřez vodiče musí být 17,5 mm², což kabel CYKY 4x25mm² splňuje.

Pro připojení kondenzátorů se používají CSA vodiče, průřez vodiče se zvolí dle doporučení od výrobce kompenzačních zařízení z katalogu ZEZ SILKO [10]. V následující tabulce (Tab. 10.12) jsou jednotlivým stupňům přiřazeny velikosti průřezů vodičů a typ zvoleného vodiče.

Tab. 10-12 Přehled vodičů použitých v rozváděči

Stupeň	Vodič	
	Typ	Průřez
	-	mm ²
1	V05S-K	2,5
2	V05S-K	2,5
3	V07S-K	4
4	V07S-K	6
5	V07S-K	10

REGULÁTOR

Kompenzace jalového výkonu byla navržena jako stupňovitá s pěti stupni, jež budou spínány pomocí regulátoru. Kompenzační zařízení je umístěno na hladině nízkého napětí s čtvrt hodinovým snímáním odebíraného výkonu. V tomto případě byl jako regulátor zvolen přístroj NOVAR 1106, který má šest výstupních relé. Je napájen přímo ze sítě nízkého napětí, kteréžto slouží taktéž jako vstup měřeného napětí, proudová sonda může být připojena na libovolnou fázi. V praxi se připojuje na fázi kde je nejmenší cosφ v tomto případě je to fáze L1.

SKŘÍŇ

Kompenzační zařízení bude uloženo v oceloplechovém rozváděči o rozměrech výška 800 mm šířka 600 mm a hloubka 300 mm s dostatečnou rezervou pro montáž, stupeň krytí IP40, barva RAL 7032. Při osazování rozváděčové skříně jednotlivými prvky se musí dbát na minimální doporučenou vzdálenost jednotlivých zařízení. V tomto případě je to minimální vzdálenost stykačů od ostatních elektrických prvků, jež je 80 mm.

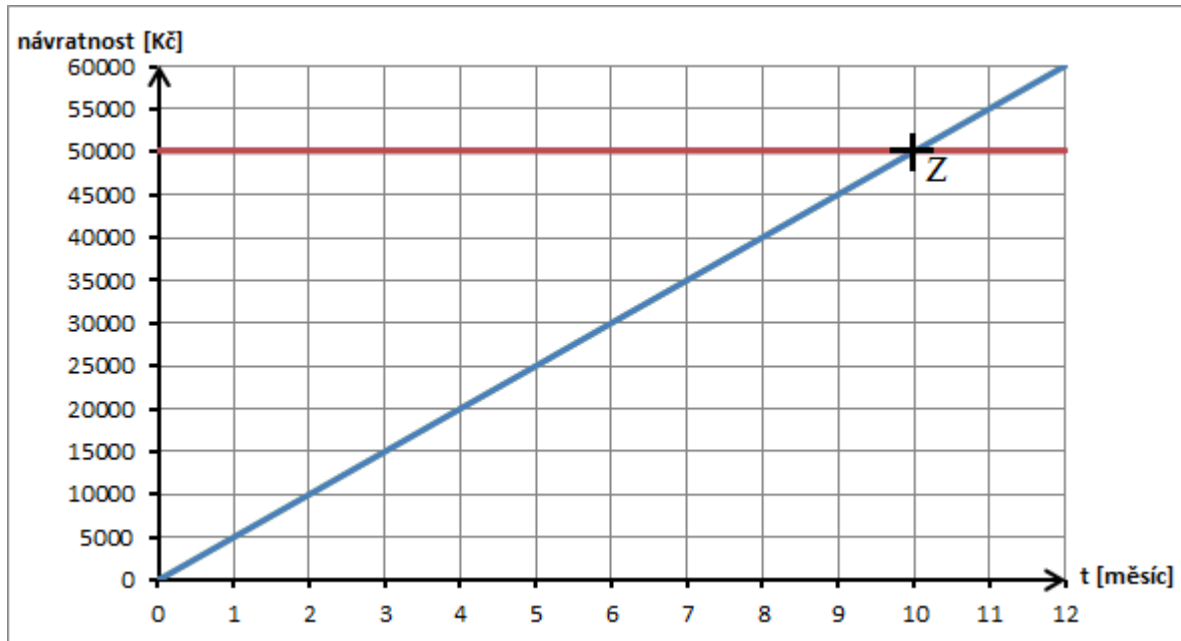
10.3 Zhodnocení

Tato kapitola se zabývá návratností investice a finanční náročností realizace kompenzačního zařízení. V tabulce (10-13) jsou uvedeny náklady na jednotlivé položky a celková cena kompenzačního zařízení. Cena jednotlivých komponentů kompenzačního zařízení je stanovena dle cen, které požadují různí prodejci. V položce montáž + oživení je kromě položek odpovídajících názvu započten i zisk montážní firmy.

Tab. 10-13 Rozpočet kompenzačního zařízení

Zařízení	Typ	Cena/kus(metr) BEZ DPH	Kusů (metrů)	Cena celkem [Kč]
KONDENZÁTORY	CSADG1-0,4/1,5	470,00	1	470
	CSADG1-0,4/3,15	540,00	1	540
	CSADG1-0,4/6,25	650,00	1	650
	CSADG1-0,4/12,5	910,00	1	910
	CSADG1-0,4/25	1470,00	1	1470
STYKAČE	K3-18K10 230	700,00	4	2800
	K3-32K00 230	994,00	1	994
POJISTKY	NH 000 4A gG 400V	96,00	3	288
	NH 000 10A gG 400V	79,00	3	237
	NH 000 16A gG 400V	79,00	3	237
	NH 000 32A gG 400V	79,00	3	237
	NH 000 63A gG 400V	79,00	3	237
VODIČE	V05S-K 2,5	14,28	6,0	85,68
	V07S-K 4	19,85	3,0	59,55
	V07S-K 6	32,45	3,0	97,35
	V07S-K 10	45,89	3,0	137,67
	CYKY 4x25	237,79	6,0	1426,74
REGULÁTOR	NOVAR 1106	4320,00	1	4320
SKŘÍŇ	Oceloplechová 800x600x300	8275,00	1	8275
Cena komponentů	bez DPH			23472,00
Montáž + oživení	bez DPH			18000
Cena celkem	bez DPH			41472,00
DPH	21%			8709,00
Cena s DPH				50181,00

V následujícím grafu (Obr. 10-6) je zobrazena návratnost investice. Graf vychází s průměrné velikosti pokuty za nedodržení účinníku. Kde červená křivka zobrazuje počáteční investici a modrá zobrazuje částku, jež byla ušetřena za jednotlivé měsíce, při splnění předpokladu s průměrnou velikostí pokuty. Bod Z označuje bod zvratu, kdy se vrátí počáteční investice v tomto případě je to po deseti měsících provozu kompenzačního zařízení.



Obr. 10-6 Návratnost investice

11 ZÁVĚR

Vzhledem k rostoucím cenám elektrické energie a požadavků na ochranu klimatu a životního prostředí. Je snaha o co největší hospodárnost v nakládání s energiemi, kde kompenzace jalového výkonu může hrát velmi výraznou roli, protože s rostoucí cenou elektrické energie se zkracuje doba návratnosti investic do kompenzačních zařízení.

V první kapitole je vysvětlen fyzikální princip kompenzace a požadavky z hlediska legislativy na kompenzaci jalového výkonu. S porovnáním se staršími cenovými rozhodnutími energetického regulačního úřadu vyplývá, že se podmínky neustále zpříšňují a roste cena za nevyžádaný jalový výkon dodaný do sítě. Další kapitoly se věnují rozdělení kompenzace a návrhu kompenzačních komponentů. V sedmé kapitole jsou uvedeny některé jevy, jež ovlivňují návrh kompenzátoru a je uveden teoretický postup návrhu kompenzátoru pro individuální kompenzaci a pro kompenzaci v sítích s vysokým obsahem harmonických.

V deváté kapitole je příklad pro návrh individuální kompenzace asynchronního motoru. Pro stanovení velikosti kompenzačního výkonu pro účinník $\cos\varphi=0,95$ jsou použity tři metody. První metoda je nejpřesnější a umožňuje stanovit kompenzační výkon pro jakýkoliv účinník. Druhá metoda dává stejné výsledky jako první, protože vycházejí ze stejného principu kdy je za výraz v závorkách u rovnice (7.1) dosazen původní účinník a požadovaný účinník. Platí jen pro požadovaný účinník $\cos\varphi=0,95$ a $\cos\varphi=1$. Ve třetí metodě je velikost kompenzačního výkonu stanovena pomocí tabulky (7.4) tato metoda patří mezi nejméně přesné. Z vypočteného potřebného kompenzačního výkonu vybereme s katalogů pro kondenzátory určené ke kompenzaci nejvhodnější a provedeme výpočet ztrát a úbytků napětí pro výkon zvolených kondenzátorů. Pro velikost kompenzačního výkonu stanoveného metodou jedna a dva dojde k poklesu ztrátového výkonu o 40,4 % a úbytek napětí se zmenší o 78,37 % oproti metodě tři, kdy jsou výkonové ztráty menší 31,6 % a úbytek napětí se zmenší o 61,24%. Navíc po kontrole účinníku vyjde, že pro kompenzační výkon dle metod jedna a dva je účinník $\cos\varphi=0,966$ a pro metodu tři je $\cos\varphi=0,906$ to znamená, že nebyl splněn požadavek na účinník roven nebo větší než $\cos\varphi=0,95$. V tomto případě bychom museli zvolit kondenzátor o větším výkonu a zkontrolovat účinník a ztráty.

Poslední kapitola se zabývá návrhem kompenzace pro průmyslového odběratele. Tato část práce je rozdělena na tři podkapitoly, kde první se zabývá stavem před kompenzací z ekonomického hlediska tj. pokutou za nedodržení účinníku. Druhá část je zaměřena na návrh kompenzačního zařízení, návrh vychází ze záznamů elektroměru a měření provedeném ve firemní síti. Kompenzační zařízení bylo navrženo jako nehrazená stupňovitá kompenzace o pěti stupních s maximálním kompenzačním výkonem 50 kVAr. Velikost kompenzačního výkonu byla navýšena z důvodu rezervy v případě připojení dalších elektrických strojů. Dále bylo navrženo připojení kompenzačního zařízení ke stávající instalaci přívodním kabelem CYKY 4x25 o délce 5 m. V poslední části je celkové vyúčtování kompenzačního zařízení, kde počáteční investice vyšla 50 181 Kč a návratnost investice je odhadována na deset až jedenáct měsíců. Při návrhu bylo využíváno konzultací ve firmě Kompel s Ing. Rostislav Martinák.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KORENC, Vladimír, HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi. 1. vydání. Praha: IN-EL, 1999. 123 stran. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] HÁLA, Pavel; LACINA, Břetislav. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. 1. vydání. Brno: Ing. Pavel Hála Elektromanagement, 1994. 90 stran.
- [3] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu : sborník přednášek. 1. vydání. Trutnov: H.V.K.L PROPAG TEAM, 1997. 27 stran.
- [4] BLAŽEK, Vladimír; SKALA, Petr. Distribuce elektrické energie (skriptum). Brno: Vysoké učení technické. 135 stran.
- [5] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2012ze dne 30. listopadu 2012 [online], http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV9_2012.pdf
- [6] HOLOUBEK, Jiří a Ing. Jaroslav PAWLAS. Filtračně-kompenzační zařízení velkého výkonu. ELEKTRO. 2007, č. 11, s. 4. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36196
- [7] KOŠTÁL, Josef. Kompenzace elektrického jalového výkonu. ELEKTRO. 2009, č. 3, s. 3. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38682
- [8] MOLNÁR, Miloš. ZLEPŠENÍ ÚČINÍKU V ENERGETICE A NÁVRH VHODNÝCH KOMPENZAČNÍCH PROSTŘEDKŮ. Dostupné z: <http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf>
- [9] DNA ENERGIE. *Váš dodavatel komponentů a služeb v oblasti kompenzace účiníku a úspor elektrické energie*. Kolín, 2012. Dostupné z: http://www.dna.cz/energie/ckfinder/userfiles/files/DNA_Energie_katalog_2012.pdf
- [10] ZEZ SILKO. KOMPENZACE JALOVÉ ENERGIE. Žamberk, 2012. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/customZone/files/pfcnew.pdf>
- [11] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. Rozvodná zařízení (skriptum). Brno: Vysoké učení technické. 144 stran.