

# **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**

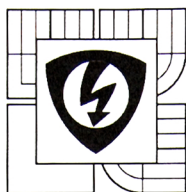
## **KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU V PRAXI**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**MARTIN TOMEŠ**

**BRNO 2012**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Martin Tomeš

**Ročník:** 3

**ID:** 125325

**Akademický rok:** 2011/12

**NÁZEV TÉMATU:**

## Kompenzace jalového výkonu v praxi

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Kompenzace jalového výkonu – základní pojmy, principy, druhy kompenzace.
2. Komponenty kompenzačních zařízení.
3. Příklad výpočtu kompenzace jalového výkonu.
4. Kompenzace jalového výkonu pro konkrétního odběratele.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**



**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

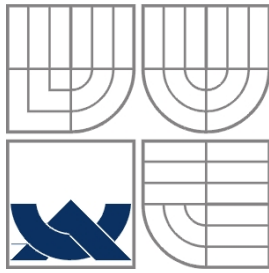
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

TOMEŠ, M. Kompenzace jalového výkonu v praxi. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012, 38 stran.

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 v praxi**

**Martin Tomeš**

**vedoucí: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



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



**Bachelor's Thesis**

# **The reactive-power compensation in practice**

**by**

**Martin Tomeš**

**Supervisor: doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2012**

**Brno**

**ABSTRAKT**

Práce se zabývá kompenzací jalového výkonu v praxi. Teoretická část popisuje základní pojmy v kompenzaci účinníku, důvody kompenzace, jakým způsobem se kompenzuje, popřípadě sankce za nedodržení stanoveného účinníku. Pozornost je věnována základnímu rozdělení kompenzace a kompenzačních zařízení, kterými jsou kondenzátory a hradící tlumivky. Praktická část práce je zaměřena na řešení kompenzace účinníku u konkrétního odběratele, kde je navržena centrální kompenzace, a na kompenzaci jalového výkonu hrazenou metodou, která je v dnešní době často používána z důvodu zvyšování počtu nelineárních zátěží.

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

**ABSTRACT**

The work deals with reactive-power compensation (power factor correction = PFC) in practice. The theoretical part describes the basic concepts of power factor correction, reasons for the PFC, and the ways of the PFC, eventually a sanction for a breach of rated power factor. Attention is given to basic partition of the PFC and compensation devices which are capacitors and detuning reactors. The practical part is focused on the PFC analysis for a concrete customer where the central compensation is projected. The practical part is also focused on a detuned power factor correction which is often used by reason of increases in number of nonlinear loads nowadays.

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

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2 ÚVOD DO KOMPENZACE .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 JALOVÝ VÝKON .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 ÚČINÍK .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 PRINCIP KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU.....</b>	<b>13</b>
2.3.1 DŮVODY KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU.....	15
2.3.2 TARIF ZA JALOVOU ENERGII .....	15
<b>3 DRUHY KOMPENZACE .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 SÉRIOVÁ KOMPENZACE .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 PARALELNÍ KOMPENZACE.....</b>	<b>18</b>
3.2.1 JEDNOTLIVÁ (INDIVIDUÁLNÍ) KOMPENZACE .....	19
3.2.2 SKUPINOVÁ KOMPENZACE.....	20
3.2.3 ÚSTŘEDNÍ (CENTRÁLNÍ) KOMPENZACE .....	20
3.2.4 SMÍŠENÁ KOMPENZACE .....	21
<b>4 KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 ROTAČNÍ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2 STATICKÉ KOMPENZÁTORY .....</b>	<b>22</b>
4.2.1 KOMPENZAČNÍ KONDENZÁTORY .....	23
4.2.2 TLUMIVKY .....	25
<b>5 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU PRO KONKRÉTNÍHO ODBĚRATELE.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 ZADÁNÍ .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2 ROZBOR ZADÁNÍ .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 VYPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>30</b>
<b>5.4 SHRnutí.....</b>	<b>34</b>
<b>6 KOMPENZACE JALOVÉ ENERGIE HRAZENOU METODOU .....</b>	<b>35</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>38</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>39</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů .....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2-2 Fázorový diagram ideální indukčnosti a kapacity .....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2-3 Blokové schéma kompenzace – a) bez kompenzace b) úplná kompenzace c) částečná kompenzace .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-4 Vliv kompenzace .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-5 Trojúhelník kompenzovaného výkonu.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3-1 Blokové schéma sériové kompenzace .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3-2 Fázorový diagram sériové kompenzace .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3-3 Blokové schéma sériové kompenzace .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-4 Fázorový diagram paralelní kompenzace .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-5 Jednotlivá kompenzace asynchronního motoru a) nn b) vn .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-6 Skupinová kompenzace .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-7 Centrální kompenzace .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4-1 V-křivky synchronního stroje.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4-2 Kompenzační kondenzátory NN [4] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4-3 Kompenzační kondenzátory VN [5].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4-4 Kondenzátor pro indukční zařízení [6] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4-5 Tlumicí kondenzátory pro IGBT tranzistory [7].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4-6 Sériový RLC článek .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4-7 Závislost impedance na frekvenci kompenzačního článku .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5-1 Grafické rozložení proudu .....</i>	<i>30</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 2-1 Velikost cenových přírůžek, stav rok 2009 [8] .....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 4-1 Maximální obsahy harmonických napětí a proudu kompenzačních článků dle ČSN 50160 [2].....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 5-1 Komponenty kompenzační baterie zámečnické výroby 125 kVar.....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5-2 Regulátory jalové energie typu NOVAR.....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 5-3 Katalogové hodnoty kompenzačních kondenzátorů NN.....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 5-4 Katalogové hodnoty stykačů paralelní kompenzace NN.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5-5 Katalogové hodnoty válcových pojistek.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5-6 Pojistkové odpínače řady OPV 14.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6-1 Katalogové hodnoty kompenzačních kondenzátorů VN.....</i>	<i>36</i>

# 1 ÚVOD

V dnešní době je využívání elektrické energie nezbytnou součástí lidského života. Tento druh energie umožňuje provoz elektrických spotřebičů a zařízení, např. motory, světelné zdroje, elektrické pece, domácí spotřebiče apod. Problematika kompenzace jalového výkonu je velmi podrobněji a soustavněji diskutované téma již od počátku 70. let, kdy začalo zohledňování účinníku odběru elektrické energie v její ceně. Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Následující kapitola teoretické bakalářské práce se věnuje základním pojmům kompenzace jalového výkonu. Zde je vysvětlen, co je účinník, jakým způsobem se dá kompenzovat, důvody kompenzace, popřípadě jaké jsou sankce za nedodržení účinníku stanovené vyhláškou.

Ve třetí kapitole je uvedeno rozdělení kompenzace jalového výkonu na sériovou a paralelní. Sériová kompenzace, která zlepšuje napěťové poměry, není tak moc podrobně vysvětlena, protože neřeší problém kompenzace jalového výkonu jako paralelní kompenzace. Paralelní kompenzace, která snižuje účinník, je podrobněji vysvětlena a rozdělena do čtyř skupin kompenzací: jednotlivá, skupinová, ústřední a spíšená kompenzace.

Čtvrtá kapitola má název kompenzační zařízení. Kompenzační zařízení se rozděluje na dvě základní skupiny: rotační a statické kompenzátory. Statické kompenzátory jsou rozděleny dále na kompenzační kondenzátory a tlumivky. Obě základní skupiny jsou podrobně popsány a vysvětleny. Z webových stránek společnosti ZEZ SILKO s.r.o. byly vybrány a popsány některé v současné době používané kompenzační kondenzátory.

Poslední dvě kapitoly praktické části bakalářské práce se věnují výpočtu kompenzačního zařízení. V prvním příkladu je rozebrána klasická metoda, kde pro kompenzaci účinníku jsou navrhovány kondenzátory, stykače, pojistky a pojistkové odpínače. Druhý příklad se věnuje metodě, při níž je použita vysokonapěťová hrazená individuální kompenzace.

## 2 ÚVOD DO KOMPENZACE

Tato úvodní kapitola vysvětluje základní pojmy kompenzace jalového výkonu a je velmi důležitou součástí pro další kapitoly.

### 2.1 Jalový výkon

Jalový výkon  $Q$  (Var) je dán vztahem

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (2.1)$$

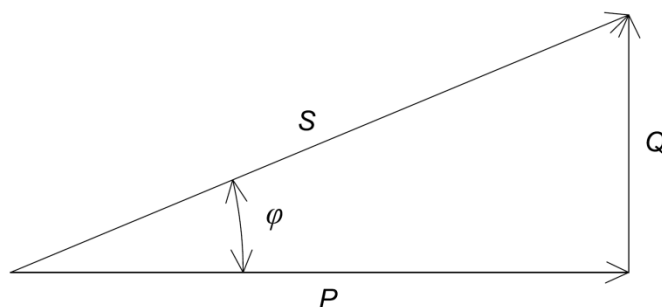
kde  $U$  - napětí sítě,  $I$  - odebíraný proud. Jalový výkon je součástí tří složek výkonů. Další dvě složky tvoří činný výkon  $P$

$$P = UI \cos \varphi, \quad (2.2)$$

kde  $\cos \varphi$  – účinnost, a zdánlivý výkon  $S$  (VA)

$$S = UI. \quad (2.3)$$

Mezi těmito složkami platí tzv. trojúhelník výkonů (Obr.2-1), ze kterého je odvozen vztah 2.4, popisující výpočet zdánlivého výkonu jako vektorový součet výkonu činného a jalového.



Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů

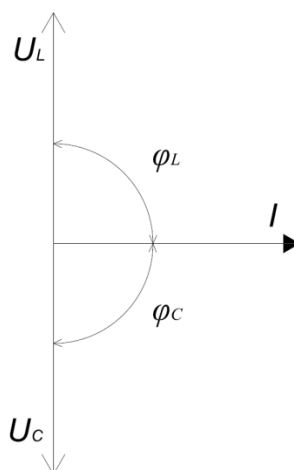
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.4)$$

Jalový výkon je nezbytnou součástí určitých strojů (motor, transformátor) a bude podrobněji popsán v dalších oddílech.

### 2.2 Účinnost

Elektrické spotřebiče přeměňují elektrickou energii na jiný druh energie. Činný výkon je specifický v tom, že převádí energii na světelnou (svítidla), mechanickou (otáčení hřídele motoru) a tepelnou (elektrické pece). Jednotka činného výkonu je W, která je pojmenovaná podle skotského inženýra Jamese Watta. Určité spotřebiče (motory a transformátory) [1] vyžadují ke své práci jalovou energii. Bez ní by se nevytvořilo magnetické pole, které je vytvářeno vinutími. Vinutí má indukční charakter a dochází k fázovému posunu proudu proti napětí. Tento fázový posun se označuje úhlem  $\varphi$  a udává se ve stupních. U ideální indukčnosti je fázový posun  $\varphi_L = 90^\circ$ . Opačné vlastnosti ideální indukčnosti má ideální kapacita. Místo magnetického pole vytvářené cívku vzniká pole elektrické, jehož vznik je podmíněn kondenzátorem. Fázový posun je oproti ideální indukčnosti opačný  $\varphi_C = -90^\circ$  (Obr.2-2). V praxi se ideální indukčnosti, ideální kapacity, ani ideální ohmické odpory nevyskytují. U skutečných spotřebičů a elektrických

rozvodů elektrické energie se zmíněné vlastnosti vyskytují společně, proto fázový posun mezi proudem a napětím nebude  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ , ani  $-90^\circ$  (ohmický odpor – tepelné spotřebiče, vláknové žárovky; kapacita – kondenzátor; ohmický odpor a indukčnost – elektromotory, transformátory; ohmický odpor a kapacita – dlouhé kabely).



Obr. 2-2 Fázorový diagram ideální indukčnosti a kapacity

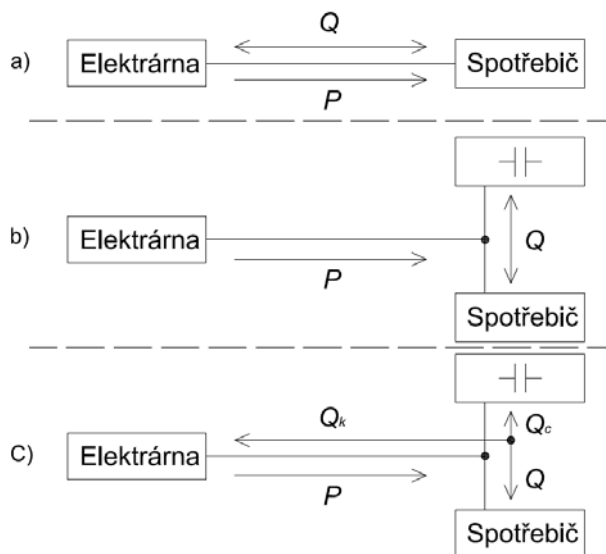
Velikost fázového posunu mezi proudem a napětím udává účinník

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (2.5)$$

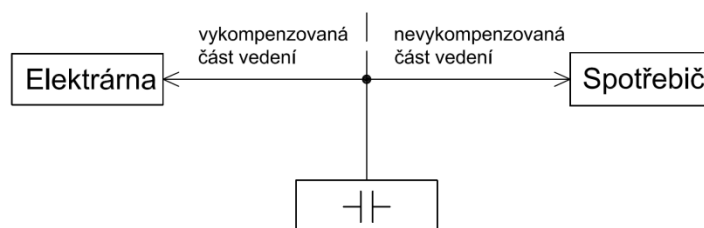
Pro ideální ohmický odpor ( $\varphi_R = 0^\circ$ ) je  $\cos \varphi = 1$ . Pro ideální indukčnost ( $\varphi_L = 90^\circ$ ) a ideální kapacitu ( $\varphi_C = -90^\circ$ ) je  $\cos \varphi = 0$ . V praxi spíše dominuje spotřebič s indukčním charakterem, kde je fázový posun  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  a účinník  $0 < \cos \varphi < 1$ .

### 2.3 Princip kompenzace jalového výkonu

Jalová složka [2], i když nekoná práci, je nezbytná pro vytvoření elektrického, nebo elektromagnetického pole ve spotřebičích. Jalovou energii spotřebič vrací zpět do sítě, aniž by se využila (přeměnila) na jiný druh energie a tím byla užitečná pro provozovatele spotřebiče. Aby se tomuto jevu předešlo, je nutné ji kompenzovat. Na Obr. 2-3 vidíme, že po provedení kompenzace prochází vedením jen činný výkon. Jalový příkon zajišťuje a dodává zdroj jalového výkonu (kondenzátor). V tomto případě se jedná o úplnou kompenzaci, protože se zpět do zdroje elektrické energie (elektrárna) nevrací. V praxi se zpravidla hovoří o kompenzaci částečné, při níž se kompenzuje jen část jalové energie  $Q_c$  a zbylá  $Q_k$  se opět vrací do elektrárny. Vliv kompenzace se projevuje jen v části mezi zdrojem elektrické energie (elektrárna) a místem kompenzačního zařízení (kondenzátor) (Obr. 2-4).



Obr. 2-3 Blokové schéma kompenzace – a) bez kompenzace b) úplná kompenzace c) částečná kompenzace

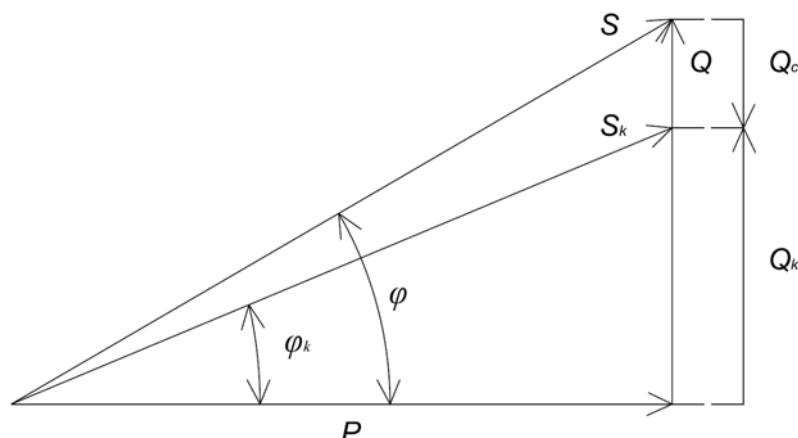


Obr. 2-4 Vliv kompenzace

Pro výpočet zdánlivého výkonu vyjdeme z obecného vztahu, jehož velikost je vektorový součet činného a jalového výkonu. Skutečný (zdánlivý) proud je též vektorovým součtem proudu činného a jalového

$$I = \sqrt{I_c^2 + I_j^2}. \quad (2.6)$$

Se stoupajícím proudem rostou jak náklady pořizovací, tak i provozní. Pro správné provozování spotřebiče nemůžeme snížit činnou složku proudu, proto je nutné snižovat jalovou, která vede ke snížení jalového výkonu (Obr. 2-5).



Obr. 2-5 Trojúhelník kompenzovaného výkonu

### 2.3.1 Důvody kompenzace jalového výkonu

Mezi hlavní důvody kompenzace jalového výkonu patří:

- **snížení zatížení a úbytků na vedení** – zmenšení proudové zátěže a ohmických ztrát dosáhneme pomocí snížení jalového proudu, který odlehčí napájecí vedení od jalového výkonu,
- **prodloužení životnosti napájecího vedení** – menší zatíženost napájecího vedení,
- **snížení pořizovacích nákladů** – snížení ceny pomocí dimenzování strojů, přístrojů a napájecího vedení na menší proudy,
- **levnější sazba za elektrickou energii** – menší odebíraný zdánlivý výkon,
- **odlehčení generátorů.**

### 2.3.2 Tarif za jalovou energii

Povinnost každého odběratele elektrické energie je kompenzovat jalový výkon v tzv. neutrálním pásmu. V České republice se pohybuje v rozmezí  $\cos \varphi = 0,95$  až  $\cos \varphi = 1$ . Nedodrží-li spotřebitel toto neutrální pásmo, bude mu jeho dodavatel účtovat přírážku k platbě za elektrickou energii. Každému odběrateli elektrické energie je předepsána legislativa v následujících dokumentech:

- **zákon Parlamentu** – Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon) 458/2000 Sb.,
- **vyhláška Energetického regulačního úřadu** – o podmínkách připojení k elektrizační soustavě 51/2006 Sb.,
- **legislativa Ministerstva financí ČR** – ceník elektrické energie č. 01/99.

Tab. 2-1 Velikost cenových přírážek, stav rok 2009 [8]

rozsah tg $\varphi$	cos $\varphi$	přírážka %	rozsah tg $\varphi$	cos $\varphi$	přírážka %	rozsah tg $\varphi$	cos $\varphi$	přírážka %
0,311-0,346	0,95	-	0,764-0,789	0,79	21,32	1,217-1,249	0,63	53,47
0,347-0,379	0,94	1,12	0,790-0,815	0,78	22,94	1,250-1,281	0,62	56,03
0,380-0,410	0,93	2,26	0,816-0,841	0,77	24,61	1,282-1,316	0,61	58,67
0,411-0,440	0,92	3,43	0,842-0,868	0,76	26,32	1,317-1,350	0,60	61,40
0,441-0,470	0,91	4,63	0,869-0,895	0,75	28,07	1,351-1,386	0,59	64,23
0,4710,498	0,90	5,85	0,896-0,922	0,74	29,87	1,387-1,423	0,58	67,15
0,499-0,526	0,89	7,10	0,923-0,949	0,73	31,72	1,424-1,460	0,57	70,18
0,527-0,553	0,88	8,37	0,950-0,977	0,72	33,63	1,461-1,494	0,56	73,31
0,554-0,580	0,87	9,68	0,978-1,007	0,71	35,58	1,495-1,532	0,55	76,56
0,581-0,606	0,86	11,02	1,008-1,034	0,70	37,59	1,533-1,579	0,54	79,92
0,607-0,632	0,85	12,38	1,035-1,063	0,69	39,66	1,580-1,620	0,53	83,42
0,633-0,659	0,84	13,79	1,064-1,092	0,68	41,80	1,621-1,663	0,52	87,05
0,660-0,685	0,83	15,22	1,093-1,123	0,67	43,99	1,664-1,709	0,51	90,82
0,686-0,710	0,82	16,69	1,124-1,153	0,66	46,25	1,710-1,755	0,50	94,70
0,711-0,736	0,81	18,19	1,154-1,185	0,65	48,58	> 1,755	<0,50	100
0,737-0,763	0,80	19,74	1,186-1,216	0,64	50,99			

Povinnost dodržování účinníku v neutrálním pásmu s výjimkou odběrů pro domácnost se týká odběratelů:

- **kategorie A** – odběrné zařízení je připojeno o napětí mezi fázemi nad 52 kV (velmi vysoké),
- **kategorie B** – odběrné zařízení je připojeno o napětí mezi fázemi od 1 kV do 52 kV (vysoké napětí),
- **kategorie C** – odběrné zařízení je připojeno o napětí mezi fázemi do 1 kV (nízké napětí) a nesloží pro odběr domácností.

Způsob měření účinníku v odběrových místech se provádí dálkovým odečtem dat, nebo pomocí ručního terminálu. V době pracovních dní od 6 do 10 hodin se provádí ¼ hodinové měření činné v kWh a jalové energie v kVARh. V daném časovém pásmu (např. měsíc) se z hodnot stanoví průměrná velikost účinníku a vypočte se příslušný tg  $\varphi$  odpovídající poměru

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q}{P}. \quad (2.7)$$

Velikost cenových přírážek jsou uvedené v tabulce (Tab.2-1), kde odpovídajícímu cos  $\varphi$  a tg  $\varphi$  (2.4) je přiřazena procentuální přírážka. Nevyžádaná dodávka jalové energie je posuzována 24 hodin denně a je zpoplatněna 400 Kč/MVARh.

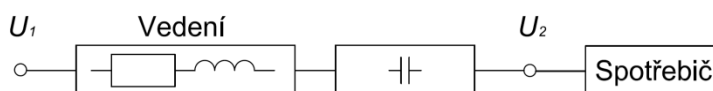


### 3 DRUHY KOMPENZACE

Kapitola se zabývá rozdělením kompenzace podle druhu a to na sériovou a paralelní. Sériovou kompenzací, která má za cíl zlepšení napěťových poměrů, se až moc zabývat nebudeme. V hlavním případě si však popíšeme paralelní kompenzací, která slouží ke snížení účinníku.

#### 3.1 Sériová kompenzace

U sériové kompenzace [1] jsou kondenzátory zapojeny v sérii s kompenzovaným zařízením (Obr.3-1). Nejvíce se tato metoda využívá u svářeček, pro vedení vvn a pro vedení vn. Vložený kondenzátor musí být dimenzován na provozní proud, kterým jím protéká.

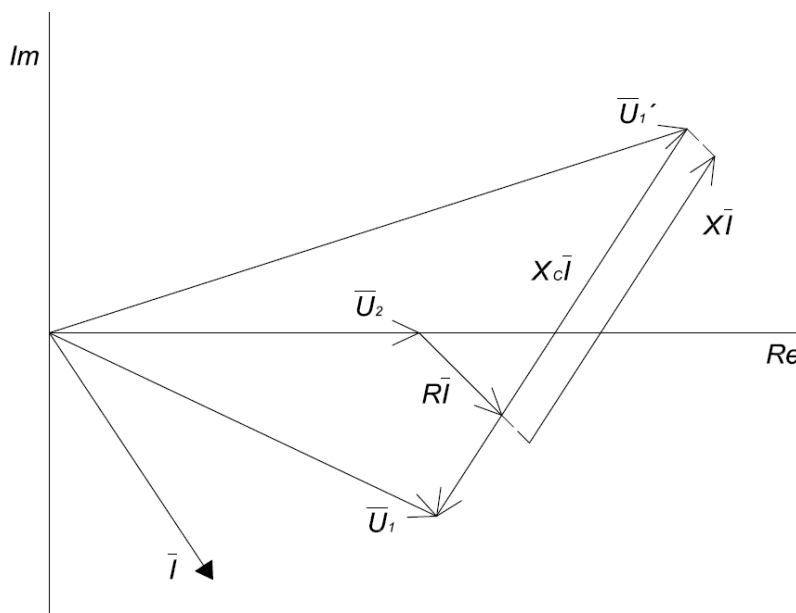


Obr. 3-1 Blokové schéma sériové kompenzace

Výkon kondenzátoru se spočítá

$$Q_C = UI_C = \frac{I_C^2}{\omega C}, \quad (3.1)$$

kde  $U$  – napětí na svorkách kondenzátoru,  $I_C$  – proud kondenzátorem,  $C$  – kapacita kondenzátoru. U sériové kompenzace je proud kondenzátoru totožný s proudem vedení, a proto se mění výkon kondenzátoru se zatížením. Svorkové napětí též není stále a mění se s úměrně se zatížením. Tato vlastnost je žádoucí při odstraňování škodlivého vlivu velké indukčnosti elektrických zařízení. Nevýhodou sériové kompenzace je možnost vzniku přepětí nebo rezonančních jevů.

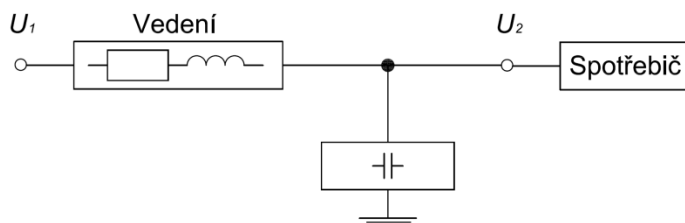


Obr. 3-2 Fázorový diagram sériové kompenzace

Fázorový diagram sériové kompenzace (obr. 3-2), kde  $\bar{U}_2$  je napětí na konci vedení,  $X$  reaktance vedení, znázorňuje změnu velikosti napětí na začátku vedení. Po připojení sériového kondenzátoru se napětí  $\bar{U}_1'$  sníží na velikost  $\bar{U}_1$ .

### 3.2 Paralelní kompenzace

Paralelní kompenzace [1] je známější metoda, kde kondenzátor se zapojuje paralelně ke kompenzovanému zařízení (Obr.3-3). Tato metoda byla již popsána v kapitole 2.2. Kapacitní jalový výkon kondenzátorů kompenzuje induktivní jalový výkon vyžadovaný elektrickým spotřebičem. Pomocí paralelní kompenzace snižujeme ztráty při přenosu elektrické energie, což je jedním z nejdůležitějších a ekonomicky nejvýhodnějších opatření.



Obr. 3-3 Blokové schéma sériové kompenzace

Ve chvíli, kdy připojíme paralelní kondenzátor, dojde ke změně fázoru proudu z velikosti  $I'$  na velikost  $I_k$  (Obr.3-4). Celkový proud se vypočítá

$$\bar{I}_k = \bar{I}' + \bar{I}_c \quad (3.2)$$

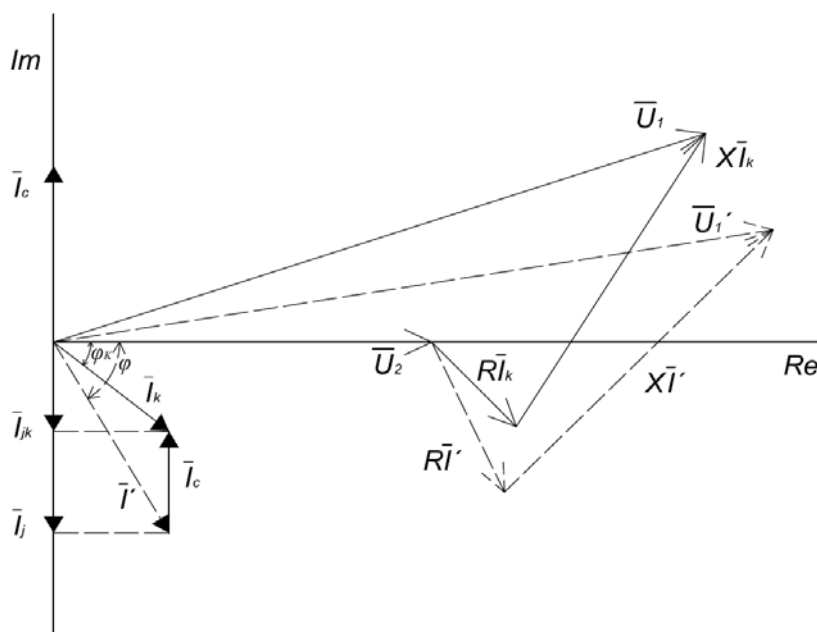
Uvažujeme, že odebíraný činný výkon bude stále konstantní. Po připojení kondenzátoru se fázový posuv změnil z hodnoty  $\varphi$  na hodnotu  $\varphi_k$  a poměr jalových složek proudů  $I_{jk}$  a  $I_j$  bude stejný jako tangenty příslušných úhlů, potom

$$\frac{I_{jk}}{I_j} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_k}{\operatorname{tg} \varphi} = k, \quad (3.3)$$

kde  $k$  je koeficient kompenzace.

Potřebný výkon kondenzátoru ke změně fázového posuvu z hodnoty  $\varphi$  na hodnotu  $\varphi_k$

$$Q_c = UI_c = U_2^2 \omega C = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k). \quad (3.4)$$



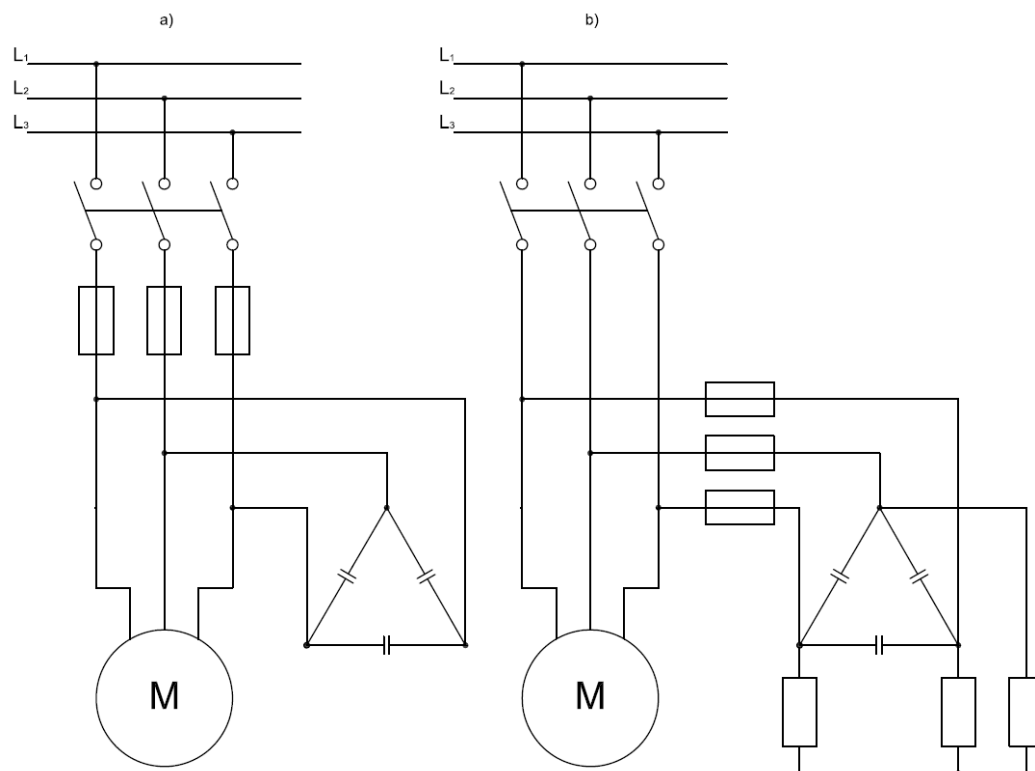
Obr. 3-4 Fázorový diagram paralelní kompenzace

Fázorový diagram (Obr.3-4) ukazuje průběhy napětí a proudů před a po připojení kondenzátoru. Veličiny označené čárkou jsou hodnoty před kompenzací.

### 3.2.1 Jednotlivá (individuální) kompenzace

Individuální kompenzace [1] spočívá v tom, že se na každý elektrický spotřebič připojí dimenzované kompenzační zařízení co nejbližně přístroji. Od jalového výkonu se tedy odlehčí celé elektrické vedení od zdroje až po spotřebič. Obr.3-5 [1] znázorňuje kompenzaci asynchronního motoru nízkého a vysokého napětí. U motoru, který je provozován v nízkém napětí, se kompenzační zařízení připojuje na svorky motoru bez jištění. Po odepnutí stroje od sítě, se kondenzátory vybíjí přes vinutí motoru. Kompenzační kondenzátory pro nn mají vnitřní pojistky, proto se nesmějí používat pro kompenzaci vn.

Kondenzátory pro kompenzaci ve vn nemají vnitřní pojistky, proto musí být jištěny zvlášť. Kondenzátory se vybíjejí pomocí zařazených odporů, které nejsou součástí kondenzátoru.



Obr. 3-5 Jednotlivá kompenzace asynchronního motoru a) nn b) vn

#### 3.2.1.1 Výhody jednotlivé kompenzace

Výhody jednotlivé kompenzace jsou:

- Kondenzátory pro kompenzaci činného výkonu stroje jsou v blízkosti elektrického spotřebiče. Tím je zaručeno správné vykompenzování stroje při každém zapnutí a dojde k odlehčení i přívodu ke spotřebiči a k maximálnímu snížení úbytku v přívodu.
- Nedochozí k překompenzování, protože kondenzátor se zapíná a vypíná spolu se spotřebičem.
- Při vypínání kondenzátoru nevzniká nebezpečí přepětí.

### 3.2.1.2 Nevýhody jednotlivé kompenzace

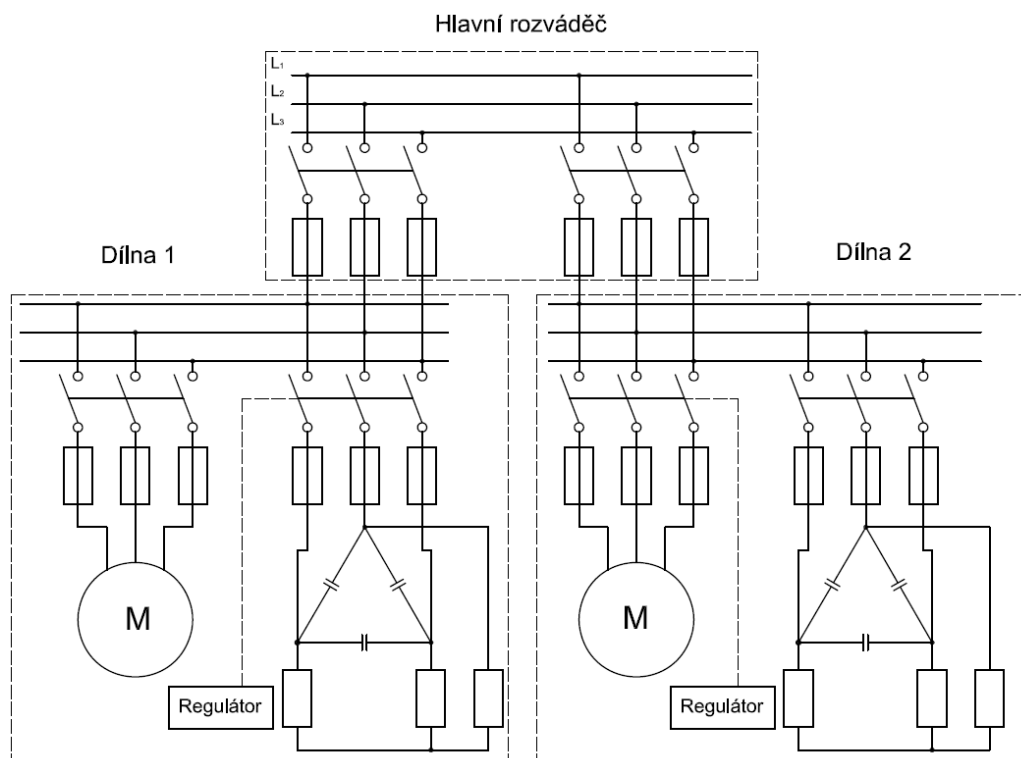
Do nevýhod jednotlivé kompenzace patří:

- Využití kondenzátorů závisí na chodu stroje. U málo využívaných strojů jsou i málo využívané kondenzátory. Celkové pořizovací náklady v závodě se zvyšují.
- Kontrola a údržba kondenzátorů je obtížnější vzhledem k rozptýlenosti.

### 3.2.2 Skupinová kompenzace

Při skupinové kompenzaci [1] se kondenzátory připojují na přípojnice skupinového rozváděče dílen (Obr.3-6 [1]). Nejčastěji se tento druh kompenzace využívá v rozvodu nízkého napětí. Úsek od hlavního rozváděče po skupinové rozváděče je odlehčený. Skupinová kompenzace se používá pro elektrické spotřebiče v určitém objektu s výkonem pod 5 kW s nízkou dobou provozu.

Hlavní výhodou oproti jednotlivé kompenzaci je větší úspora kompenzačních zařízení (kondenzátorů). Za to nevýhodou této metody je nutnost, aby kondenzátory měly vypínače a jištění. Vzniká tu potřeba řídit zapínání a vypínání kondenzátorů podle průběhů odebíraného jalového výkonu automatickou regulací.

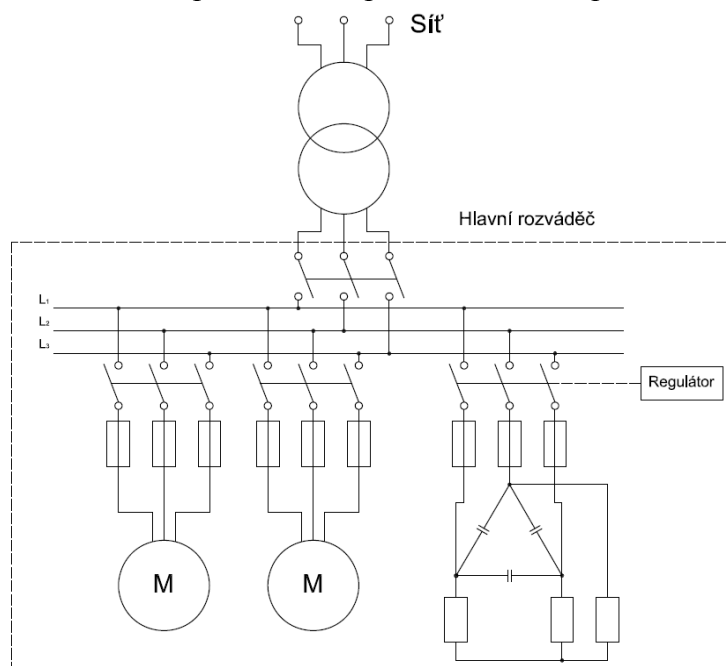


Obr. 3-6 Skupinová kompenzace

### 3.2.3 Ústřední (centrální) kompenzace

Centrální kompenzace [1] zajišťuje kompenzaci jalového výkonu pro celý odběr podniku (Obr.3-7 [1]). V závislosti na velikosti odebíraného jalového výkonu je nutno automaticky regulovat velikost kompenzace a dimenzovat na příslušnou hodnotu kapacity. Dříve se pro tuto kompenzaci nn používalo reléových automatů, hlavně WOR 2 až 8, v dnešní době se používá v rozvodu nn elektronická automatika RQx (x – číslo, které udává počet regulačních stupňů).

Výhodou centrální kompenzace je úspora výkonů, pořizovacích nákladů a nenáročnost na prostor. Kontrola a údržba kondenzátorů je snadná díky dobré přístupnosti do kompenzační části. Nevýhodou je takřka značná nepřesnost kompenzace a nízká operativnost v jejím ovládní.



Obr. 3-7 Centrální kompenzace

### 3.2.4 Smíšená kompenzace

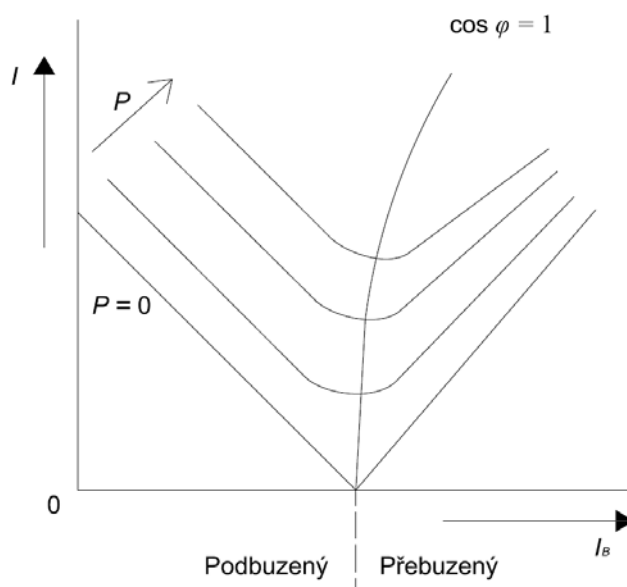
Smíšená kompenzace je nejčastějším řešením vedoucí ke snížení účinníku. Při této metodě se kombinují dvě, nebo všechny tři druhy zmíněných kompenzací. U skupiny malých motorů s kratší dobou provozu se použije skupinová kompenzace, než u skupiny motorů s velkým odběrem a nepřetržitým chodem, kde se použije jednotlivá kompenzace. Obecně nejde říci jaká kompenzace je nejvýhodnější. Vychází se z několika alternativ, které jsou nejefektivněji a nejekonomičtěji navrženy pro daný podnik.

## 4 KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola se zaměřuje na problematiku kompenzačních zařízení. Uvedeme si základní rozdělení kompenzátorů, které se dělí na rotační a statické, a vysvětlíme si jejich principy. Statické kompenzátoři se dále dělí na kompenzační kondenzátory a tlumivky.

### 4.1 Rotační kompenzační zařízení

Mezi rotační kompenzační zařízení [2] patří synchronní kompenzátoři a synchronní motory. Tyto motory se vyznačují tím, že mají samostatné budící vinutí napájené stejnosměrným proudem pro vytvoření magnetizačního pole stroje. Synchronní motory se používají na takových místech, kde se očekává stabilní zátěžný moment. Jsou to pohony např. čerpadel, ventilátorů, kompresorů, apod. Změnou velikosti proudu budícího vinutí při konstantním zátěžném momentu a o stálém kmitočtu dosáhneme regulaci účinníku. Motor můžeme provozovat jak v induktivní, tak i v kapacitní oblasti. Závislost proudu statoru na budícím proudu při stálém výkonu má tvar tzv. V-křivek (Obr.4-1).



Obr. 4-1 V-křivky synchronního stroje

Synchronní motory pracují naprázdno, kdy je odebíraný činný výkon malý a rozsah regulace jalového výkonu velká. Převážně jsou konstruovány pro hladiny vysokého napětí obvykle pro síť 6 kV.

Nevýhody těchto rotačních kompenzačních zařízení je jejich velikost. Proto se nahrazují statickými kompenzátoři. Další nevýhody jsou pořizovací náklady, údržba strojů a zdroj stejnosměrného napětí pro budící část motoru.

### 4.2 Statické kompenzátoři

Rozdíl mezi rotačními a statickými kompenzátoři [2] je takový, že statické kompenzátoři nepotřebují pro svůj účel odebírat činnou energii. Jsou tvořeny pasivními kompenzačními prvky, jako jsou výkonové kondenzátory.

### 4.2.1 Kompenzační kondenzátory

Kompenzační kondenzátory se řadí do výkonových kondenzátorů. Existuje mnoho typů výkonových kondenzátorů. Vazební, impulzní, rázové, komutační, odrušovací a jiné. Jedním je i kondenzátor určený pro zlepšení účinnosti elektrických spotřebičů na střídavý proud. Tento typ kondenzátoru vyžaduje zabezpečení zejména těchto tří hlavních požadavků:

- *tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu,*
- *odolnost proti přepětí,*
- *spolehlivost a bezpečnost provozu.*

Výpočet velikosti jalového výkonu  $Q_c$  jednofázového kondenzátoru se spočítá podle vztahu

$$Q_c = P\{\operatorname{tg} [\arccos (\cos \varphi_1)] - \operatorname{tg} [\arccos (\cos \varphi_2)]\}, \quad (4.1)$$

kde  $P$  – činný výkon spotřebiče,  $\cos \varphi_1$  – původní účinník,  $\cos \varphi_2$  – výsledný účinník.

#### 4.2.1.1 Kompenzační kondenzátory NN

Kompenzační kondenzátory [4] jsou určeny pro všechny tři druhy paralelní kompenzace v sítích nízkého napětí. Jsou vyráběny systémem MPK, který tvoří metalizované polypropylénová fólie, která zaručuje velmi nízké dielektrické ztráty. Dielektrický systém je samoregenerační, v suchém provedení. Kondenzátory jsou plněny pevnou kompaktní hmotou rostlinného původu (typové označení pro 3 fázové CSADP, CSAKP a 1 fázové CVADP, CVAKP) nebo netečným ekologicky nezávadným plynem (typové označení pro 3 fázové CSADG, CSAKG a 1 fázové CVADG, CVAKG), ve kterých jsou zalaty vlastní svitky. Oba tyto prvky jsou netoxické a ekologicky nezávadné a tak nehrozí znečištění životního prostředí (např. průsak impregnační kapaliny). Celá válcová nádobka kondenzátoru je chráněna přetlakovým odpojovačem proti roztržení, který má za úkol při přetížení, stárnutí, nebo na konci vlastní životnosti bezpečně odpojit kondenzátor od sítě.

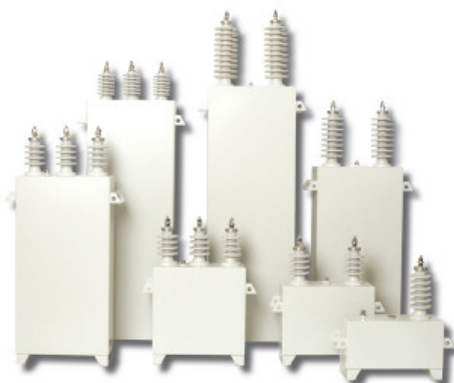


Obr. 4-2 Kompenzační kondenzátory NN [4]

#### 4.2.1.2 Kompenzační kondenzátory VN

Kompenzační kondenzátory [5] VN jsou určeny pro filtraci vyšších harmonických. Vynikají velmi nízkými ztrátami. Dielektrikum je konstruováno do provedení all-film (celofóliové), které je z polypropylenové fólie. Fólie je impregnovaná syntetickou kapalinou (známá pod obchodním názvem Jarylec), která je zdravotně a ekologicky nezávadná. Elektrody tvoří hliníkové fólie.

Kondenzátory VN mají jako kondenzátory NN vestavěny vnitřní vybíjecí odpory, které zajišťují snížení napětí na 74 V do 10 minut. VN kondenzátory jsou vyráběny v 1 fázovém (značení – I, typ – CUEFS 23) a 3 fázovém provedení se zapojují do hvězdy (značení – Y, typ CPEFS 23).



Obr. 4-3 Kompenzační kondenzátory VN [5]

#### 4.2.1.3 Kondenzátory pro indukční zařízení

Kondenzátory pro indukční zařízení [6] jsou speciálně určené pro kompenzaci a ladění obvodů indukčních ohřevů a pecí. Konstrukce provedení těchto kondenzátorů je stejná jako u kondenzátorů VN (all-film) a jsou vybaveny vodním chlazením, obvykle s jedním společným pólem na nádobě. Velmi důležitým faktorem je dodržení předepsané teploty a množství chladicí vody. Vícenásobné vývody, které umožňují vysoké proudové zatížení, slouží pro doladování obvodů do rezonance.



Obr. 4-4 Kondenzátor pro indukční zařízení [6]

#### 4.2.1.4 Tlumící kondenzátory pro IGBT tranzistory

Tlumící kondenzátory pro IGBT tranzistory [7] jsou vyráběny technologií typu MKP v suchém provedení, která tvoří metalizovaná polypropylenová fólie. Vlastnost samohojení kondenzátoru zaručuje vysokou odolnost při napěťových špičkách. Speciální konstrukce má velmi nízké hodnoty vlastní indukčnosti a sériového odporu.





Obr. 4-5 Tlumicí kondenzátory pro IGBT tranzistory [7]

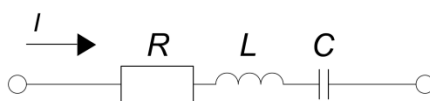
## 4.2.2 Tlumivky

S novou dobou přicházejí i nové technologie. Zvýšení počtu nelineárních zátěží roste a negativně ovlivňují výkonové stroje a přístroje, které napájí střídavý proud (pohony, usměrňovače, napájecí zdroje, apod.).

### 4.2.2.1 Ochranné tlumivky

Základní vlastností kondenzátorů [2] je frekvenční závislost. Se zvyšujícím se kmitočtem kapacitní reaktance kondenzátoru klesá a to má za následek vzrůst efektivní hodnoty proudu. Následně se bude přetěžovat nejen samotný kondenzátor, ale i část sítě mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem. Tam kde nevyžadujeme chráněné kompenzační sekce, musí být podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů cca 10 až 15 %. Následky vlivem harmonických zkreslení mohou vést ke snížení životnosti kondenzátoru a zbytečným spínání jističů a dalších ochran.

K odstranění nebezpečí vzniku rezonančního stavu slouží tzv. rezonanční obvod. Ten se skládá ze tří prvků  $R, L, C$  (Obr.4-6).



Obr. 4-6 Sériový RLC článek

Součástky v tomto zapojení jsou schopné pracovat v širokém spektru kmitočtů. Mezi hlavní kmitočty patří pracovní kmitočet  $f_n$  a rezonanční  $f_r$ .

Při sériovém zapojení tlumivky a kondenzátoru dochází ke zvýšení napětí na kondenzátoru

$$U_c = \frac{U_n}{\left[1 - \frac{p}{100}\right]}, \quad (4.2)$$

kde  $p$  je ladící frekvence je tzv. činitel zatlumení, který se vypočítá podle vztahu

$$p = \frac{X_L}{X_C} \cdot 100 = \frac{1}{\left(\frac{f_r}{f_n}\right)^2} \cdot 100, \quad (4.3)$$

za podmínky, že  $X_L \ll X_C$  se aplikují ochranné tlumivky

$$X_L = p \cdot X_C, \quad (4.4)$$

Z reaktance tlumivky se vypočte její indukčnost

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}, \quad (4.5)$$

reaktance kompenzačního článku

$$X_{LC} = (1 - p)X_C, \quad (4.6)$$

reaktance kondenzátoru se vypočte z jeho vlastní kapacity

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (4.7)$$

Celkový výkon kompenzačního LC článku

$$Q_{LC} = \frac{U_s^2}{(1 - p) \cdot \left(\frac{U_n^2}{Q_n}\right)}, \quad (4.8)$$

kde  $U_s$  je sdružené napětí,  $U_n$  jmenovité napětí kondenzátoru a  $Q_n$  jmenovitý výkon kondenzátoru.

Ochranné tlumivky se využívají zejména u stupňových kondenzátorových kompenzátorů se stykačovým nebo bezkontaktním řízením výkonu. Vlastnosti tlumivek:

#### ➤ Omezení zapínacího proudového rázu

Při připojení vybitého kondenzátoru [2] k síti dojde k proudovému přechodovému jevu, který se vyznačuje tlumeným kmitavým průběhem, jehož amplituda a kmitočet jsou dány velikostí napětí sítě, kapacitou kondenzátoru, okamžikem sepnutí a impedancí obvodu mezi připínaným kondenzátorem a zdrojem napětí. Z teoretických výpočtů, ale i z praktických měření na skutečných zařízeních lze dokázat, že velikost amplitudy přechodového děje výrazně překračuje i stonásobek jmenovitého proudu  $I_n$  a kmitočet dosahuje nad hodnotu 10 kHz. Takovýto přechodový děj má za následek soustavné poškozování přístrojů, jako jsou např. opalování kontaktů stykačů, spolehlivost provozu zařízení s nižší elektromagnetickou odolností elektronických zařízení pro řízení a kontrolu výrobních technologií, telekomunikační techniku, výpočetní techniku apod.

Omezení amplitudy  $I_n$  a kmitočtu přechodového jevu při spínání kapacit můžeme dosáhnout zvýšením impedance mezi připínaným a již připnutým kondenzátorem. Ta se dá zvýšit trvale po celou dobu připnutí kondenzátoru nebo dočasně, jen na dobu spínání.

Trvalým zvýšením impedance dosáhneme pomocí tlumivky vzduchové nebo se železným jádrem. Vzduchové tlumivky jsou v provedené stočením zapojovacích vodičů na průměru 80 – 100 mm asi o deseti závitech. Tyto tlumivky dosahují nízké indukčnosti 10 – 20  $\mu\text{H}$  a omezují amplitudy  $I_n$  na hodnoty kolem 30 %. Druhým typem tlumivek jsou s feromagnetickým jádrem. Regulace indukčnosti lze optimálně volit pomocí konstrukce magnetického obvodu, velikostí vzduchové mezery a konstrukce vinutí. Značná nevýhoda těchto tlumivek spočívá v jejich rozměrech, hmotnosti a ceně.

### ➤ Omezení rezonančních jevů

Kompenzační kondenzátory [2] mohou rezonovat s indukčností sítě  $L_s$  na kmitočet stejném nebo blízkém některé harmonické. Řád harmonické je roven

$$n = \frac{\omega}{\omega_1} = \frac{f}{f_1}, \quad (4.9)$$

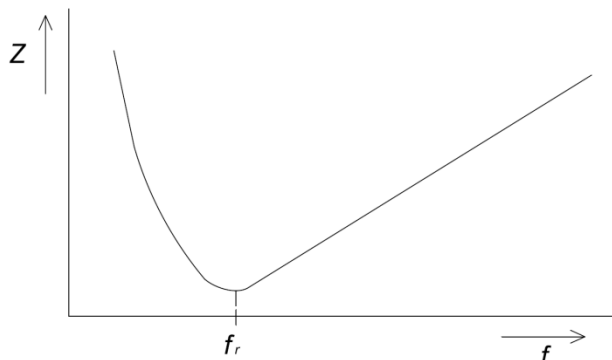
kde index 1 znamená základní harmonickou.

Kondenzátory společně s ochrannými tlumivkami [2] tvoří sériový rezonanční obvod laděný na kmitočet mezi 150 – 250 Hz nebo 100 – 150 Hz. Rezonanční kmitočet  $f_r$  bývá volen u různých výrobců v širokých mezích. Teoreticky nejlépe vyhovuje kmitočet okolo  $n_r \equiv 2,5$ , který vede u tlumivek k neekonomičnosti (velké, těžké, drahé). Proto musí být volha posunuta mezi 3. a 5. harmonickou. Volen je pak optimální kmitočet  $f_r$ , který vychází z činitele rozladění. (7 % -  $f_r = 189$  Hz; 14% -  $f_r = 134$  Hz). Chráněn musí být zejména kmitočet HDO, který nesmí být příliš potlačen nebo rezonancemi zdůrazněn.

Tab. 4-1 Maximální obsahy harmonických napětí a proudu kompenzačních článků dle ČSN 50160 [2]

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
HDO	216 <sup>2/3</sup>	1	7,8	Většina oblasti ČR
THD	100 – 2000	8	max. 80	Za předpokladu jen 3. a 5. harmonické
$\sqrt{\Sigma I_n^2}$	50 – 350	-	1,182	Koeficient pro výpočet max. efektivního proudu
$\Sigma I_n$	50 - 350	-	232	Při všech harmonických se překračuje THD

kde řádek THD – Total Harmonic Distortion – přípustný efektivní obsah všech harmonických napětí, řádek HDO – regulace odběru elektrické energie na dálku, řádek  $\sqrt{\Sigma I_n^2}$  - poměrný efektivní proud (vztaženo k  $n = 1$ ), řádek  $\Sigma I_n$ - algebraický součet všech složek proudů (rozhoduje o rezervě pro magnetickou indukci  $B_M$ ).



Obr. 4-7 Závislost impedance na frekvenci kompenzačního článku

#### 4.2.2.2 Filtrační tlumivky

Filtrační tlumivky oproti chráněným tlumivkám bývají značně předimenzované a cenově dražší. I navzdory chráněným tlumivkám, které v současnosti dominují v instalacích kompenzačních rozváděčů, je nutné občas použít filtr naladěný na charakteristickou harmonickou. Filtrační tlumivky se standardně nevyrobějí, a proto je nutný zvláštní návrh a výroba.

#### 4.2.2.3 Dekompenzační tlumivky

Dekompenzace je opak kompenzace. Dekompenzační tlumivky se používají tam, kde je nadbytek kapacitního výkonu (rozsáhlé průmyslové sítě, speciální napájecí kabelové rozvody, atd.). Dále se dekompenzace používá ve spojení s plynule řízenými kompenzátory jalového výkonu. Tím navenek vůči síti dochází k plynulé dodávce kapacitního výkonu. Tento princip dekompenzace se využívá v nízkém, ale hlavně ve vysokém napětí v plynulých kompenzátorech pro elektrické obloukové pece.

## 5 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU PRO KONKRÉTNÍHO ODBĚRATELE

Tato kapitola praktické části bakalářské práce se věnuje kompenzací jalového výkonu pro konkrétního průmyslového odběratele. Cílem bude navrhnout kompenzační zařízení pro rozšiřující se výrobní prostory.

### 5.1 Zadání

Do nově vybudovaných prostor byla přesunuta firma MBG, spol. s r.o., která se zabývá výrobou vybavení interiérů prodejen (výroba regálového systému). Důvodem přestěhování společnosti byla modernizace Zámečnické části výroby a rozšiřování nového pracoviště Stolárna. Toto nové pracoviště je prozatím ve výhledu a přistavět by se mělo do roku 2020.

#### Současný stav

Skladová a výrobní část Zámečnické výrobní má instalovaný výkon  $P_i = 320$  kW, celková velikost účinníku je  $\cos \varphi = 0,7$ , který je kompenzován na  $\cos \varphi_k = 0,96$ . Stroje jsou napájené z napěťové hladiny 0,4 kV. Kompenzace jalového výkonu je řešena centrální nehrazenou kompenzací o třífázovém výkonu kompenzační baterie  $Q_c = 125$  kVar, rozdělený do osmi kompenzačních stupňů

$$Q_c = 2 \cdot 6,25 \text{ kVar} + 3 \cdot 12,5 \text{ kVar} + 3 \cdot 25 \text{ kVar} = 125 \text{ kVar.}$$

Osazení rozváděče kompenzační baterie zámečnické výrobní se nalezne v tabulce 5-1, kde je uveden typ, výrobce a počet kusů nainstalovaných dílů.

Tab. 5-1 Komponenty kompenzační baterie zámečnické výrobní 125 kVar

Název	Typ	Výrobce	Kusů
Kondenzátor	CSADG 1-0,4/6,25	ZEZ SILKO	2
Kondenzátor	CSADG 1-0,4/12,5	ZEZ SILKO	3
Kondenzátor	CSADG 1-0,4/25	ZEZ SILKO	3
Stykač	LA3K181.	SCHRACK	5
Stykač	LA3K323.	SCHRACK	3
Válcová pojistka	PV14 10A gG	OEZ	6
Válcová pojistka	PV14 20A gG	OEZ	9
Válcová pojistka	PV22 40A gG	OEZ	9
Pojistkový odpínač	OPV 145-3	OEZ	5
Pojistkový odpínač	OPV 225-3	OEZ	3
Regulátor jalového výkonu	NOVAR 1114	ZEZ SILKO	1

#### Budoucí stav

Nové výrobní prostory budou mít předpokládaný instalovaný výkon  $P_i = 250$  kW při uvažovaném účinníku  $\cos \varphi = 0,75$ . Napěťová hladina strojů 0,4 kV.

Navrhněte sériovou kompenzací jalového výkonu průmyslového podniku, která by vedla ke zlepšení odebíraného účinníku na hodnotu  $\cos \varphi_k = 0,96$ . Při návrhu kompenzační baterie vycházejte z doposud navržených kompenzačních komponentů.

## 5.2 Rozbor zadání

Přibližně do roku 2020 by se měli původní prostory zámečnické výroby rozšiřovat. Přistavět by se měla nová hala stolárna s předpokládaným instalovaným výkonem strojů  $P_i = 250$  kW. Jedná se pouze o teoretickou hodnotu. Případné navýšení či snížení výkonu se promítne do návrhu kompenzace, kde by musel být opět přepočten třífázový výkon kompenzační baterie. Kompenzace jalového výkonu bude řešená centrálně. Jedná se o nehrazenou kompenzaci, protože u instalovaných strojů se nepředpokládá, že by byly zdrojem přetěžování harmonických, které by negativně ovlivňovali spolehlivost a bezpečnost provozu spotřebičů, ale i rozvodných zařízení. Při novém návrhu kompenzační baterie a výběru kompenzačních komponentů se použijí ze staré kompenzační skříně a tím se po ekonomické stránce ušetří.

## 5.3 Vypracování

Celkový odběrový proud  $|I|$

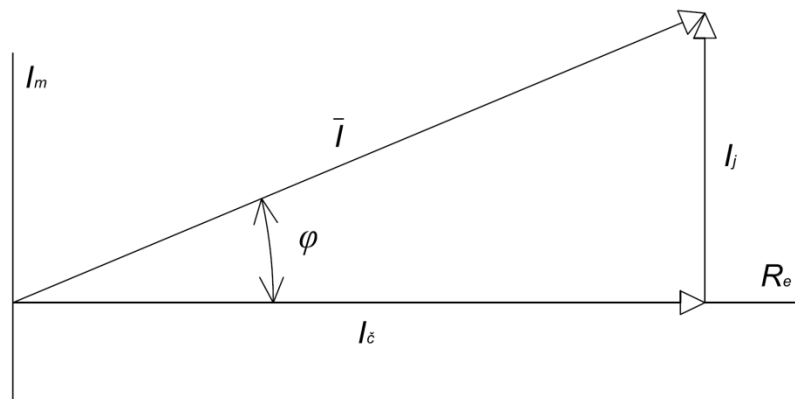
$$|I| = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} \quad (5.1)$$

se rozděluje na činnou a jalovou složku (Obr.5-1), jehož matematický zápis je roven

$$\bar{I} = I_{\check{c}} + jI_j \quad (5.2)$$

Ve většině případů je zátěž induktivního charakteru

$$\bar{I} = I_{\check{c}} - jI_j \quad (5.3)$$



Obr. 5-1 Grafické rozložení proudu

Účinník nekompensovaného a kompenzovaného proudu se vypočte

$$\cos \varphi = \frac{I_{\check{c}}}{|I|}, \cos \varphi_k = \frac{I_{\check{c}k}}{|I_k|} \quad (5.4)$$

K výpočtu kompenzovaného proudu platí podmínka, kdy činný proud musí mít stejnou hodnotu před a po kompenzaci  $I_{\check{c}} = I_{\check{c}k}$ . Po vyjádření činného nekompensovaného proudu  $I_{\check{c}}$  z rovnice 5.3, dosadíme za  $I_{\check{c}k}$  a vyjádřením  $|I_k|$  vznikne

$$|I_k| = |I| \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k}. \quad (5.5)$$

Na začátek vypočteme proud  $|I_1|$ , který odebírá Zámečnická výrobná, z instalovaného výkonu  $P_1$ , odebíraného účinníku  $\cos \varphi_1$  a sdruženého napětí  $U_s$ , podle vztahu (5.1)

$$|I_1| = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi_1} = \frac{320 \cdot 10^3 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,7} = 659,8 \text{ A},$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= |I_1| \cdot \cos \varphi_1 - j |I_1| \cdot \sin \varphi_1 = |I_1| \cdot \cos \varphi_1 - j |I_1| \cdot \sin(\arccos(\cos \varphi_1)) \\ &= 659,8 \text{ A} \cdot 0,7 - j 659,8 \text{ A} \cdot \sin(\arccos(0,7)) = (461,86 - j 471,19) \text{ A}. \end{aligned}$$

Výpočet proudu odebíraného částí Stolárny  $|I_2|$

$$|I_2| = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi_2} = \frac{250 \cdot 10^3 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,75} = 481,1 \text{ A},$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_2 &= |I_2| \cdot \cos \varphi_2 - j |I_2| \cdot \sin \varphi_2 = |I_2| \cdot \cos \varphi_2 - j |I_2| \cdot \sin(\arccos(\cos \varphi_2)) \\ &= 481,1 \text{ A} \cdot 0,75 - j 481,1 \text{ A} \cdot \sin(\arccos(0,75)) = (360,83 - j 318,22) \text{ A}. \end{aligned}$$

Celkový odběrový proud  $\bar{I}$  se vypočte součtem odebíraných proudů Zámečnické výrobní a Stolárny

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = (461,86 - j 471,19) \text{ A} + (360,83 - j 318,22) \text{ A} = (822,69 - j 789,41) \text{ A},$$

$$|I| = 1140,2 \text{ A},$$

$$\cos \varphi = 0,722.$$

Pomocí celkového odebíraného proudu, účinníku před kompenzací a účinníku po kompenzací se vypočte podle vzorce (5.5) celkový odebíraný kompenzovaný proud  $|I_k|$

$$|I_k| = |I| \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k} = 1140,2 \text{ A} \cdot \frac{0,722}{0,96} = 857,53 \text{ A},$$

rozdílem celkového odebíraného nekompenzovaného  $|I|$  a kompenzovaného  $|I_k|$  proudu se vypočte odebíraný proud kompenzační baterie

$$|I_c| = |I| - |I_k| = 1140,2 \text{ A} - 857,53 \text{ A} = 282,67 \text{ A},$$

třífázový výkon kompenzační baterie

$$Q_{cn} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot |I_c| = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 282,67 \text{ A} = 195,8 \text{ kVar}.$$

Celkový kompenzační výkon baterie činí  $Q_{cn} = 195,8 \text{ kVar}$ . Aby výkon mohl být jednoduše rozdělen na jednotlivé stupně kompenzace, musí být navýšen na hodnotu  $Q_c = 200 \text{ kVar}$ . Odchylka tohoto navýšení činí 2 %, což může brát jako za zanedbatelnou hodnotu. V praxi se velikost kompenzačního stupně zjišťuje z měření pomocí síťového analyzátoru, který stanovuje nejmenší a dále vyšší stupně, nebo z diagramu zatížení. V našem případě se použije stará kompenzační baterie (125 kVar), do které se zařadí další tři kompenzační stupně o výkonech kondenzátorů  $Q_n = 25 \text{ kVar}$ . Celkové rozdělení kompenzačních stupňů poté bude

$$Q_{celk} = 2 \cdot 6,25 \text{ kVar} + 3 \cdot 12,5 \text{ kVar} + 6 \cdot 25 \text{ kVar} = 200 \text{ kVar}.$$

Kompenzační baterie bude rozdělena do 11 stupňů kompenzace. Použitý regulátor jalového výkonu NOVAR 1114 je schopen spínat až 14 regulovaných stupňů (TAB. 6-2 [14]). Z toho vyplývá, že nebude potřeba navrhovat nové rozložení kompenzačních stupňů, aby se počet regulovatelných stupňů snížil.

Tab. 5-2 Regulátory jalové energie typu NOVAR

Typ	PDF	Napájecí napětí	Měřicí napětí	Počet regulovaných stupňů	"Váhy"	Požadovaný účinník	Spínací doba	Rozměry šxv x hl [mm]
NOVAR 1106		230 (115) V AC	230	6	volby	0,80 ind.-0,90 cap.	5 - 1200	144x144x80 (138x138)
NOVAR 1114		230 (115) V AC	230	14	volby	0,80 ind.-0,90 cap.	5 - 1200	144x144x80 (138x138)
NOVAR 1206		230 (115) V AC	110-690	6	volby	0,80 ind.-0,90 cap.	5 - 1200	144x144x80 (138x138)
NOVAR 1312		230 (115) V AC	230	12	volby	0,80 ind.-0,90 cap.	5 - 1200	144x144x80 (138x138)
NOVAR 1214		230 (115) V AC	110-690	14	volby	0,80 ind.-0,90 cap.	5 - 1200	144x144x80 (138x138)

Tabulka 5-2 představuje katalogové hodnoty kompenzačních kondenzátorů NN [10] na napěťové hladině  $U_{ns} = 0,4$  kV, které vyrábí firma ZEZ Silko. Pro výkon  $Q_n = 25$  kVar odpovídá kondenzátor s kapacitou  $C_n = 3 \times 165,8 \mu\text{F}$  a jmenovitým proudem  $I_n = 36,1$  A.

Tab. 5-3 Katalogové hodnoty kompenzačních kondenzátorů NN

Type Typ	Output Výkon $Q_N$ [kvar]	Current Proud $I_N$ [A]	Capacitance Kapacita $C_N$ $\mu$	Dimensions Rozměry $\varnothing D \times H$ [mm]	Weight Hmotnost [kg]	Protection degree Stupeň krytí	Drawing Výkres
CSADG 1-0,4/1	1,00	1,4	3 x 6,6	85 x 175	0,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/1,5	1,50	2,2	3 x 9,9	85 x 175	0,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/2	2,00	2,9	3 x 13,3	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/2,5	2,50	3,6	3 x 16,6	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/3,15	3,15	4,5	3 x 20,9	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/4	4,00	5,8	3 x 26,5	85 x 175	0,8	IP20	1
CSADG 1-0,4/5	5,00	7,2	3 x 33,2	85 x 175	0,9	IP20	1
CSADG 1-0,4/6,25	6,25	9,0	3 x 41,4	85 x 175	1,0	IP20	1
CSADG 1-0,4/8	8,00	11,5	3 x 53,1	85 x 245	1,0	IP20	1
CSADG 1-0,4/10	10,00	14,4	3 x 66,3	85 x 245	1,1	IP20	1
CSADG 1-0,4/12,5	12,50	18,0	3 x 82,9	85 x 245	1,2	IP20	1
CSADG 1-0,4/15	15,00	21,7	3 x 99,5	110 x 245	1,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/20	20,00	28,9	3 x 132,6	110 x 245	1,9	IP20	1
CSADG 1-0,4/25	25,00	36,1	3 x 165,8	110 x 245	2,1	IP20	1
CSADG 3-0,4/30	30,00	43,3	3 x 198,9	136 x 220	3,3	IP20	1
CSADG 3-0,4/33,3	33,30	48,1	3 x 220,8	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADG 3-0,4/37,5	37,50	54,1	3 x 248,7	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADG 3-0,4/40	40,00	57,7	3 x 265,3	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADP 3-0,4/50	50,00	72,2	3 x 331,6	136 x 355	5,5	IP20	2

Ke spínání jednotlivých stupňů kompenzace jsou zapotřebí kompenzační stykače. Vybrány jsou od výrobce SCHRACK Technik. Z katalogu 5-3 [11] je možno vybírat stykače do 75 kVar s napětím 400/690 V. Hlavním kritériem pro výběr stykače je spínaný výkon kompenzačního stupně a jmenovitý proud, jehož velikost je závislá na okolní teplotě.

Pro kompenzační stupeň 25 kVar nalezneme stykač LA3K323. jehož jmenovitý proud se vypočte

$$I_{styk} = \frac{Q_{styk}}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{25 \cdot 10^3 \text{ Var}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 36,08 \text{ A,}$$

pracující na hladině napětí 400 V. Kondenzátorový stykač je vybaven tlumícími odpory, aby se omezovali špičky zapínacího proudu na  $< 70 \times I_n$ .



Tab. 5-4 Katalogové hodnoty stykačů paralelní kompenzace NN

## Kompenzační stykače

- Do 75kVar/400V
- Technická data podle ČSN EN 60947



Jmenovité hodnoty		12,5kVar	12,5kVar	20kVar	25kVar	33,3kVar	50kVar	75kVar
380-400V		20kVar	20kVar	33kVar	41kVar	55kVar	82kVar	100kVar
660-690V								
le	690V při 50 °C	18A	18A	28A	35A	48A	72A	105A
Typ		LA3K181.	LA3K182.	LA3K243.	LA3K323.	LA3K1503.	LA3K623.	LA3K743.
Pomocné kontakty		1Z	1R	-	-	-	-	-
Připojovací průřezy								
Drát popř. sektorový vodič	mm <sup>2</sup>	1,5 - 6		2,5 - 25		4 - 50		
Slaněný vodič	mm <sup>2</sup>	1,5 - 4		2,5 - 16		6 - 35		
Počet připojitelných vodičů na svorku		1		1		1		
Příkon cívky								
přítah VA		33 - 45		90 - 115		140 - 165		
sepnutý stav VA		7 - 10		9 - 13		13 - 18		
Rozsah napájecího napětí cívky		0,85 - 1,1		0,85 - 1,1		0,85 - 1,1		
Montáž		na panel nebo na DIN lištu						

Pro jištění jednotlivých kompenzačních stupňů jsou použity válcové pojistky, které jsou umístěny v pojistkových odpínačích. Výběr válcových pojistek z katalogu [12] se řídí podle jmenovitého proudu stykačů a na charakteristice samotných pojistek. Zvolená charakteristika gG je vhodná pro jištění kabelů, vedení a dalších zařízení před přepětím a zkratem. Kompenzační stupeň 25 kVar spínaný stykačem LA3K323. o jmenovitém proudu  $I_n = 36,1$  A, a proto bude zvolena válcová pojistka 40 A typu PV14 40A gG.

Tab. 5-5 Katalogové hodnoty válcových pojistek

	$I_n$ [A]	Charakteristika gG				Charakteristika aM				Hmotnost [kg]	Balení [ks]
		Typ	$U_n$ [V]	Kód výrobku	Ztráty [W]	Typ	$U_n$ [V]	Kód výrobku	Ztráty [W]		
10 x 38	0,25	-	-	-	-	PV10 0,25A aM	500	06688	0,11	0,011	20
	0,5	-	-	-	-	PV10 0,5A aM	500	06689	0,17	0,011	20
	1	-	-	-	-	PV10 1A aM	500	06690	0,29	0,011	20
	2	PV10 2A gG	500	06691	0,72	PV10 2A aM	500	06692	0,92	0,011	20
	4	PV10 4A gG	500	06693	1,17	PV10 4A aM	500	06694	0,25	0,011	20
	6	PV10 6A gG	500	06695	0,88	PV10 6A aM	500	06696	0,31	0,011	20
	8	PV10 8A gG	500	06697	1,04	PV10 8A aM	500	06698	0,46	0,011	20
	10	PV10 10A gG	500	06699	1,29	PV10 10A aM	500	06700	0,46	0,011	20
	12	PV10 12A gG	500	06701	1,48	PV10 12A aM	500	06702	0,47	0,011	20
	16	PV10 16A gG	500	06703	1,86	PV10 16A aM	500	06704	0,67	0,011	20
	20	PV10 20A gG	500	06705	2,20	PV10 20A aM	400	06706	0,87	0,011	20
	25	PV10 25A gG	500	06707	2,58	PV10 25A aM	400	06708	1,05	0,011	20
	32	PV10 32A gG	500	06709	2,54	PV10 32A aM	400	06710	1,50	0,011	20
14 x 51	0,25	-	-	-	-	PV14 0,25A aM	690	06711	0,12	0,020	10
	0,5	-	-	-	-	PV14 0,5A aM	690	06712	0,18	0,020	10
	1	-	-	-	-	PV14 1A aM	690	06713	0,30	0,020	10
	2	PV14 2A gG	690	06714	0,95	PV14 2A aM	690	06715	0,99	0,020	10
	4	PV14 4A gG	690	06716	1,57	PV14 4A aM	690	06717	0,31	0,020	10
	6	PV14 6A gG	690	06718	2,24	PV14 6A aM	690	06719	0,34	0,020	10
	8	PV14 8A gG	690	06720	1,20	PV14 8A aM	690	06721	0,45	0,020	10
	10	PV14 10A gG	690	06722	1,58	PV14 10A aM	690	06723	0,56	0,020	10
	12	PV14 12A gG	690	06724	1,49	PV14 12A aM	690	06725	0,63	0,020	10
	16	PV14 16A gG	690	06726	2,0	PV14 16A aM	500	06727	1,01	0,020	10
	20	PV14 20A gG	690	06728	2,24	PV14 20A aM	500	06729	1,04	0,020	10
	25	PV14 25A gG	690	06730	2,70	PV14 25A aM	500	06731	1,30	0,020	10
	32	PV14 32A gG	690	06732	3,33	PV14 32A aM	500	06733	1,94	0,020	10
40	PV14 40A gG	500	06734	3,86	PV14 40A aM	500	06735	2,04	0,020	10	
50	PV14 50A gG	500	06736	4,10	PV14 50A aM	400	06737	2,91	0,020	10	
63	PV14 63A gG	500	06738	5,35	PV14 63A aM	400	06739	3,69	0,020	10	

K vybraným válcovým pojistkám se zvolí příslušný pojistkový odpínač podle jmenovitých proudů pojistek. Z katalogu [13] českého výrobce jisticích zařízení OEZ byl vybrán tří pólový odpínač řady OPV 14 se jmenovitým proudem 63 A.

Tab. 5-6 Pojistkové odpínače řady OPV 14

Typ	Kód výrobku	$I_n$ [A]	Počet pólů	Hmotnost [kg]	Balení [ks]
OPV14S-1	38636		1	0,120	12
OPV14-N	38827		N	0,140	12
OPV14S-1N	38638		1+N	0,280	6
OPV14S-2	38639	63	2	0,260	6
OPV14S-3	38640		3	0,380	4
OPV14S-3N	38641		3+N	0,520	3
OPV14S-4	38642		4	0,520	3

## 5.4 Shrnutí

Kompenzace jalového výkonu je nezbytná v každém průmyslovém podniku, která vede ke snížení odebíraného výkonu. Navrženy byly tři kompenzační NN kondenzátory o kapacitě  $C_n = 3 \times 168,8 \mu\text{F}$ , které se přidají do staré kompenzační skříně a zvýší stávající třífázový výkon kompenzační baterie. Celkový počet 11 stupňů kompenzace zaručí jemnost regulace jalového výkonu. Jednotlivé přidané stupně kompenzace spíná kompenzační stykač LA3K323., který je vybaven tlumícími odpory pro omezení špiček zapínacího proudu. Jištění proti přetížení a zkratu zaručují válcové pojistky typu PV14 40A gG, které jsou navrženy podle jmenovitého proudu stykače. Válcové pojistky jsou v třípólových pojistkových odpínačích řady OPV 14.

## 6 KOMPENZACE JALOVÉ ENERGIE HRAZENOU METODOU

Kapitola se zabývá výpočtem hrazené kompenzace, která je podrobněji vysvětlena v kapitole 4.2.2. Tato hrazená metoda odstraňuje nebezpečí vzniku rezonančního stavu za pomoci naladění rezonanční frekvence na nižší hodnoty, kde nenacházejí žádné harmonické proudy. V následujícím příkladu bude předveden postup výpočtu při návrhu hrazené kompenzace pro cirkulační čerpadlo, jehož frekvenční měnič má za následek zkreslení napětí na napěťové hladině.

### Zadání

Cirkulační čerpadlo na oběh chladicí vody v tepelné elektrárně má výkon  $P = 710$  kW připojený na napěťovou hladinu 6 kV. Čerpadlo je poháněno regulovaným střídavým pohonem s regulátorem frekvence. Velikost účinníku motoru  $\cos \varphi = 0,84$ . Navrhněte kompenzaci jalového výkonu za předpokladu, že dochází ke značnému zkreslení napětí na hladině 6 kV (5. a 7. řád harmonické).

### Teoretický rozbor zadání

Čerpadlo je regulováno pomocí regulátoru frekvence, který značně zkresluje napětí na hladině 6 kV. Frekvence řádu 5. a 7. harmonické je 250 Hz a 350 Hz. Kondenzátorovou baterii je nutné naladit již pro nižší 5. harmonickou. Kompenzace bude řešena jako individuálně hrazená. Dále je potřeba brát v potaz, že tepelná elektrárna se nachází v oblasti signálu HDO s frekvencí 216 2/3 Hz. Rezananční frekvence se volí z pravidla  $f_r = 189$  Hz.

### Výpočet

Použitím rezonanční frekvence  $f_r$  a pracovního kmitočtu  $f_n$  se vypočte podle vztahu 4.3 činitel zatlumení, podle kterého se bude celá hrazená kompenzace navrhovat

$$p = \frac{1}{\left(\frac{f_r}{f_n}\right)^2} \cdot 100 = \frac{1}{\left(\frac{189 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}}\right)^2} \cdot 100 = 7 \%$$

Proud, který odebírá cirkulační čerpadlo, se vypočte ze jmenovitého výkonu  $P_n$ , sdruženého napětí  $U_s$  a účinníku motoru  $\cos \varphi$  podle vztahu 5.1

$$|I| = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{710 \cdot 10^3 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot 0,84} = 81,3 \text{ A}$$

Velikost odebíraného proudu  $|I_k|$  čerpadla po kompenzaci

$$|I_k| = |I| \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k} = 81,3 \text{ A} \cdot \frac{0,84}{0,98} = 69,69 \text{ A}$$

Rozdílem celkového odebíraného proudu  $|I|$  před a proudu  $|I_k|$  po kompenzaci se vypočte velikost proudu odebíraného kompenzační baterií

$$|I_c| = |I| - |I_k| = 81,3 \text{ A} - 69,69 \text{ A} = 11,61 \text{ A}$$

Výpočet třífázového výkonu kompenzační baterie

$$Q_{cn} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot |I_c| = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot 11,61 \text{ A} = 120,65 \text{ kVar.}$$

Vlivem předřazené tlumivky bude napětí na kondenzátoru  $U_c$  vyšší než síťové napětí  $U_s$  (4.2).

$$U_c = \frac{U_s}{1-p} = \frac{6 \cdot 10^3 \text{ V}}{1-0,07} = 6,45 \text{ kV}$$

Pomocí proudu a sdruženého napětí na kondenzátoru se vypočte kapacita použitého kondenzátoru.

$$C = \frac{|I_c|}{\frac{U_c}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi f} = \frac{11,61 \text{ A}}{\frac{6,45 \cdot 10^3 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi \cdot 50} = 9,92 \text{ } \mu\text{F}$$

Tabulka 6-1 představuje katalogové hodnoty [15] vybraných kompenzačních kondenzátorů VN od firmy ZEZ Silko. Výpočtem napětí na kondenzátoru  $U_c$  se ověřilo, jestli je možné použít kondenzátor na napětí  $U_n = 6,6 \text{ kV}$ . Za předpokladu, že by byla uvažována dovolená odchylka síťového napětí 10 %, tak by se zvolený typ kondenzátoru nemohl použít a volil by se z řady vyššího napětí. Z katalogu se zvolí vhodný třífázový kondenzátor podle vypočtené kapacity  $C$  a proudu  $|I_c|$ .

Tab. 6-1 Katalogové hodnoty kompenzačních kondenzátorů VN

Typ	PDF	Napětí $U^N$ [V]	Výkon $Q^N$ [kvar]	Kapacita $C^N$ [μF]	Proud $I_N$ [A]
CPEFS 23-6,6/25	<a href="#">4J5852A.pdf</a>	6 600	25,0	3x1,8	3x2,2
CPEFS 23-6,6/50	<a href="#">4J6248.pdf</a>	6 600	50,0	3x3,7	3x4,4
CPEFS 23-6,6/100	<a href="#">4J6249A.pdf</a>	6 600	100,0	3x3,7	3x4,4
CPEFS 23-6,6/150		6 600	150,0	3x11,0	3x13,1
CPEFS 23-6,6/200/WF	<a href="#">4J6251A.pdf</a>	6 600	200,0	3x14,6	3x17,5
CPEFS 23-6,6/250	<a href="#">4J5935A.pdf</a>	6 600	250,0	3x18,3	3x21,9
CPEFS 23-6,6/300		6 600	300,0	3x21,9	3x26,3

Nejbližší vyšší hodnota kapacity a proudu kondenzátoru je typ CPEFS 23-6,6/150. Jeho jmenovitý výkon  $Q_n = 150 \text{ kVar}$ , jmenovitá kapacita  $C_n = 3 \times 11 \text{ } \mu\text{F}$  a jmenovitý proud  $I_n = 3 \times 13,1 \text{ A}$ .

Z frekvence síťě  $f = 50 \text{ Hz}$  a kapacity kondenzátoru  $C = 11 \text{ } \mu\text{F}$  se vypočte podle vztahu 4.7 reaktance kondenzátoru  $X_c$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 9,92 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 320,88 \text{ } \Omega,$$

výpočet reaktance předřazené tlumivky (4.4)

$$X_L = p \cdot X_c = 0,07 \cdot 320,88 \text{ } \Omega = 22,46 \text{ } \Omega,$$

z reaktance tlumivky a frekvence se vypočte vlastní indukčnost tlumivky (4.5)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{22,46 \Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 71,49 \text{ mH.}$$

Výkon kompenzačního  $LC$  článku se vypočte podle vzorce 4.8

$$Q_{LC} = \frac{U_s^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_n^2}{Q_n}\right)} = \frac{6000^2 \text{ V}}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{6600^2 \text{ V}}{150 \cdot 10^3 \text{ Var}}\right)} = 133,3 \text{ kVar.}$$

Odchylka výkonu sériového  $LC$  článku  $Q_{LC}$  je o 9,5 % vyšší než celkový výkon třífázové kompenzační baterie  $Q_c$ . Jedná se o zanedbatelnou hodnotu. Její zmenšení by se docílilo tak, že buď by se kondenzátor vybíral od jiného výrobce, kde by se hledala přesnější kapacita kondenzátoru, nebo by se musel nechat vyrobit na zakázku. Tato druhá varianta je z ekonomického hlediska méně výhodná a znamenalo by to navýšení pořizovací ceny oproti sériově vyráběným kondenzátorům.

Proud procházející  $LC$  článkem se vypočte z výkonu kompenzačního článku  $Q_{LC}$  a hladiny sdruženého napětí  $U_s$

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{133,3 \cdot 10^3 \text{ Var}}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \text{ V}} = 12,83 \text{ A.}$$

### **Shrnutí**

Další postup při návrhu hrazené kompenzace by byl výběr tlumivky podle vypočtené indukčnosti  $L$ , hladině napětí  $U_n$  a činitele zatlumení  $p$ . Hradící tlumivky VN nejsou sériově vyráběny, a proto by se musela zhotovit na zakázku. Českým výrobcem hradících tlumivek pro VN je ZEZ Silko nebo německý výrobce Hans von Mangoldt. Kompenzační článek je připínán pouze při zapínání motoru, a proto další pomocné spínací zařízení nejsou potřeba. Ochranou proti zkratu budou zajišťovat pojistky, které jsou určeny pro použití v motorových obvodech. Výrobce ABB nabízí CEM venkovní pojistky omezující proud a disponují velkým vypínacím výkonem.

## 7 ZÁVĚR

Kompenzace jalového výkonu se řadí do základní problematiky v distribuci a pro velkou část odběratelů elektrické energie. Hlavním faktorem pro spotřebitele je sazba za jalovou energii při nedodržení účinníku, která je popsána v druhé kapitole. Ze strany distributorů se řeší různé problémy např. snížení úbytků na vedení, snížení zatížení generátorů atd., které jsou shrnuty v kapitole 2.

V této bakalářské práci je shrnuta problematika kompenzace jalového výkonu. Jsou vysvětleny základní pojmy z oblasti kompenzace jalového výkonu, rozdělení a principy kompenzace. Dále je shrnuto, kdo a z jakých důvodů má povinnost kompenzovat svůj odběr jalového výkonu a jaké jsou sankce za nedodržování stanovených vyhlášek. V druhé polovině teoretické části bakalářské práce je uvedeno rozdělení kompenzace a kompenzačních zařízení, kde jsou popsány způsoby kompenzace jalového výkonu používané v dnešní době.

Druhá část bakalářské práce se zabývá kompenzací jalového výkonu v praxi. Tato praktická část je rozdělena do dvou částí. V prvním případě je vypočtena a následně navrhována centrální kompenzační baterie, která je rekonstruována ze starého kompenzačního rozváděče. Kompenzační baterie je rozdělena do 11 stupňů kompenzace. U spotřebičů se neočekává, že by byly zdrojem nežádoucích harmonických na hladině napětí. Nelinearitou spotřebičů se se věnuje druhý příklad, kde cirkulační čerpadlo regulované frekvenčním měničem značně zkresluje základní frekvenci napětí řádu 5. a 7. harmonické na hladině 6 kV. K omezení vyšších harmonických je navržena hradící tlumivka, která se zapojuje sériově s kompenzačním kondenzátorem.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HÁLA, Pavel; LACINA, Břetislav. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. 1. vydání. Brno: Ing. Pavel Hála Elektromanagement, 1994. 90 stran.
- [2] KORENC, Vladimír, HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi. 1. vydání. Praha: IN-EL, 1999. 123 stran. ISBN 80-86230-07-4.
- [3] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu: sborník přednášek. 1. vydání. Trutnov: H.V.K.L PROPAG TEAM, 1997. 27 stran.
- [4] ZEZ Silko [online]. 2011 [cit. 2011-12-05]. Kompenzační kondenzátory NN. Dostupné z WWW: <<http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=11>>.
- [5] ZEZ Silko [online]. 2011 [cit. 2011-12-05]. Kompenzační kondenzátory VN. Dostupné z WWW: <<http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=12>>.
- [6] ZEZ Silko [online]. 2011 [cit. 2011-12-05]. Kondenzátory pro indukční zařízení. Dostupné z WWW: <<http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=3>>.
- [7] ZEZ Silko [online]. 2011 [cit. 2011-12-05]. Tlumicí kondenzátory pro IGBT tranzistory. Dostupné z WWW: <<http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=43>>.
- [8] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č.7/2009 [online]. 11/2009. Dostupné z:<[http://eru.cz/user\\_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR7\\_2009.pdf](http://eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR7_2009.pdf)>
- [9] KBH ENERGY. Kompenzace jalového výkonu [online]. Dostupné z: <http://www.kbhenergy.cz/>
- [10] ZEZ SILKO. *Kompenzace jalové energie*. Žamberk, 2012. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/PDFs/pfcnew.pdf>
- [11] SCHRACK ENERGIETECHNIK, s.r.o. *Přehled stykačů*. Praha, 2011. Dostupné z: [http://web.schrack.cz/katalog/spckatalog/prehled\\_stykacu.pdf](http://web.schrack.cz/katalog/spckatalog/prehled_stykacu.pdf)
- [12] OEZ. *Válcové pojistky: Pojistkové vložky PV*. Letohrad, 2012. Dostupné z: [http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1323-Z01-12\\_CZ\\_SK.pdf](http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1323-Z01-12_CZ_SK.pdf)
- [13] OEZ. *Odpínače a odpojovače válcových pojistkových vložek*. Letohrad, 2012. Dostupné z: [http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1297-Z01-12\\_CZ\\_SK.pdf](http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1297-Z01-12_CZ_SK.pdf)
- [14] REGULÁROTORY JALOVÉ ENERGIE: NOVAR 1106/1114. ZEZ Silko [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=71>
- [15] ZEZ SILKO. *Kompenzační kondenzátory VN: Kondenzátory typu CPEFS 23 - tři fázové*. Žamberk, 2012. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=121>