

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kompenzace jalového výkonu v průmyslovém podniku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan SÝKOROVSKÝ**
Osobní číslo: **E11N0135P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Kompensace jalového výkonu v průmyslovém podniku**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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


1. Provedte rozbor problematiky kompenzace jalového výkonu
2. Analyzujte možnosti zlepšení účinníku
3. Navrhněte kompenzační zařízení pro konkrétní podnik
4. Provedte ekonomické zhodnocení navržené kompenzace

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Konstantin Schejbal, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem kompenzačního zařízení na nízkém napětí pro firmu Václav Chmela – Galvanovna s. r. o. V práci je nejprve teoreticky popsána problematika kompenzace jalového výkonu a poté následují návrhy skupinové a centrální stupňovitě řízené kompenzace. Pro oba případy je navržena varianta klasické i chráněné kompenzace. U každého návrhu je proveden výběr kompenzačních komponentů. Následuje kalkulace výsledné ceny navrženého kompenzačního zařízení. Součástí návrhu je i stanovení návratnosti investic.

Klíčová slova

Účíník, kompenzace účíníku, hrazená kompenzace, jalový výkon, činný výkon, kompenzační zařízení.

Annotation

This diploma thesis is focused on a technical design of a compensation device for low voltage. This proposal is done for Václav Chmela – Galvanovna s. r. o. company. The first what is described in this thesis is a teoretical analysis of the compensation. After that I deal with a problem of design of a group and central gradually controlled compensation. For design of the central and group compensation was offered both classic and protected option. A choice of compensation components is performed for all cases. Then I calculated the final price for this compensation device. Last but not least a return of investment is intended.

Key words

Power factor, power factor correction, protected power factor correction, reactive power, active power, compensation device.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Konstantinu Schejbalovi, CSc. za odborné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále chci poděkovat všem vyučujícím na Fakultě elektrotechnické, kteří mi během celého studia předali své znalosti. Za vstřícný přístup a poskytnutí podkladů pro návrh kompenzace děkuji panu Václavu Chmelovi.

Obsah

Obsah	8
Seznam použitých symbolů a zkratk	12
Úvod.....	14
1 Základní pojmy a vztahy	15
1.1 Prvky R, L, C ve střídavém obvodu s harmonickými průběhy.....	15
1.2 Definování výkonů v harmonickém obvodu.....	18
1.2.1 Činný výkon	19
1.2.2 Jalový výkon.....	20
1.2.3 Zdánlivý výkon	21
1.2.4 Deformační výkon	21
1.3 Vztahy mezi výkony, účinník.....	22
1.4 Účinník v třífázovém obvodu.....	23
2 Možnosti zlepšení účinníku bez kompenzace	25
2.1 Náhrada asynchronních elektromotorů za synchronní.....	25
2.2 Vhodná volba motoru.....	25
2.3 Omezení chodu naprázdno	26
3 Zlepšení účinníku pomocí kompenzace.....	27
3.1 Princip kompenzace	27
3.2 Odvození velikosti kapacity kompenzačního kondenzátoru	28
3.3 Určení kompenzačního výkonu	29
3.4 Přínosy kompenzace.....	31
4 Druhy kompenzace dle umístění	33
4.1 Individuální kompenzace.....	33
4.1.1 Kompenzace asynchronního elektromotoru.....	34
4.1.2 Individuální kompenzace transformátoru.....	36
4.2 Skupinová kompenzace	37
4.3 Centrální kompenzace.....	38

5 Kompenzační zařízení	40
5.1 Rotační kompenzátor	40
5.2 Statické kompenzátory	41
5.2.1 Nechráněné kondenzátory	41
5.2.2 Chráněná kompenzace	43
5.2.3 Kompenzační filtry	47
5.3 Ovlivňování signálu HDO	48
6 Způsoby regulace jalového výkonu	50
6.1 Stupňovitá regulace jalového výkonu	50
6.2 Plynulá regulace jalového výkonu	51
7 Regulátory jalového výkonu	53
7.1 Regulátor WOR	53
7.2 Regulátor RQ 5U	54
7.3 Regulátory NOVAR	54
7.4 Regulátor EFR 7	56
8 Kompenzační kondenzátory	58
8.1 Kondenzátory na nízké napětí	59
8.1.1 Konstrukce	59
8.1.2 Přetlaková pojistka	61
8.1.3 Vybíjecí rezistory	62
8.1.4 Montáž	62
8.2 Kondenzátory na vysoké napětí	63
9 Způsoby spínání kondenzátorů	65
9.1 Spínání klasickými stykači	65
9.2 Spínání stykači s odporovým spínáním	67
9.3 Bezkontaktní spínání	68
10 Návrh skupinové nehrazené kompenzace	70
10.1 Kompenzace na rozvaděči PR1	71
10.1.1 Výpočet hodnot v tabulce	72

10.1.2 Výpočet kompenzačního výkonu	73
10.1.3 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	77
10.1.4 Cenová kalkulace	83
10.2 Kompenzace na rozvaděči PR 2	84
10.2.1 Výpočet kompenzačního výkonu	85
10.2.2 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	86
10.2.3 Cenová kalkulace	89
10.3 Kompenzace na rozvaděči PR 3	90
10.3.1 Výpočet kompenzačního výkonu	90
10.3.2 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	91
10.3.3 Cenová kalkulace	94
11 Návrh skupinové hrazené kompenzace	95
11.1 Hrazená kompenzace na rozvaděči PR 1	95
11.1.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	95
11.1.2 Cenová kalkulace	100
11.2 Hrazená kompenzace na rozvaděči PR 2	101
11.2.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	101
11.2.2 Cenová kalkulace	104
11.3 Hrazená kompenzace na rozvaděči PR 3	105
11.3.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	105
11.3.2 Cenová kalkulace	108
12 Porovnání hrazené a nehrazené skupinové kompenzace, výpočet ztrát	109
13 Návrh centrální nehrazené kompenzace	113
13.1 Výpočet kompenzačního výkonu.....	113
13.2 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	115
13.3 Cenová kalkulace	118
14 Návrh centrální hrazené kompenzace	119
14.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů	119
14.2 Cenová kalkulace	123
15 Porovnání hrazené a nehrazené centrální kompenzace	124

16 Celkové ekonomické zhodnocení.....	125
Závěr	128
Seznam literatury a informačních zdrojů	130
Seznam příloh	132
Přílohy	133

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	Práce
a, b, c	Jednotlivé fáze třífázové soustavy
C	Kapacita kondenzátoru
f	Frekvence
f_r	Rezonanční frekvence
f_n	Jmenovitá frekvence sítě
$i_0\%$	Procentní hodnota proudu naprázdno
I_c, I_j	Činná a jalová složka proudu
I_{0j}	Jalový proud transformátoru naprázdno
I_{0c}	Činný proud transformátoru naprázdno
I_k	Zdánlivý proud po kompenzaci
I_{jk}	Jalový proud po kompenzaci
I_c	Proud kompenzačním kondenzátorem
I_μ	Magnetizační proud transformátoru
I_{Fe}	Proud transformátoru kryjící ztráty v železe
I_{np}	Jmenovitý proud pojistky
L	Indukčnost tlumivky
L_m	Indukčnost asynchronního elektromotoru
N	Návratnost investic
p	Činitel zatlumení
P, Q, S, D	Činný, jalový, zdánlivý, deformační výkon
ΔP	Činné ztráty před kompenzací
ΔP_k	Činné ztráty po kompenzaci
Q_k	Jalový výkon po kompenzaci
Q_{komp}	Jalový výkon kompenzační baterie
Q_{0j}	Jalový příkon ve stavu naprázdno
R_m	Činný odpor asynchronního elektromotoru
R_{Fe}	Odpor modelující ztráty v železe transformátoru
S_{nT}	Jmenovitý výkon transformátoru
T	Perioda
u, i, p	Okamžité hodnoty napětí, proudu, činného výkonu

U, I	Efektivní sdružené hodnoty napětí a proudu
U_f	Efektivní hodnota fázového napětí
U_m, I_m	Maximální hodnoty napětí a proudu
U_{ib}	Budicí napětí synchronního stroje
U_s	Statorové napětí synchronního stroje
ΔU	Úbytek napětí
X_c	Kapacitní reaktance
X_L	Induktivní reaktance
X_d	Synchronní reaktance synchronního stroje v podélné ose
X_μ	Magnetizační reaktance transformátoru
Z	Impedance
ω	Úhlová frekvence
φ	Fázový posuv mezi napětím a proudem
φ_k	Fázový posuv po kompenzaci
$\cos \varphi$	Účinník harmonického obvodu
$\cos \varphi_k$	Účinník po kompenzaci
$\cos \varphi_0$	Účinník naprázdno
λ	Skutečný účinník
α	Úhel řízení tyristorů
β	Součinitel náročnosti
ϑ	Zátěžný úhel synchronního stroje
η	Účinnost
ERÚ.	Energetický regulační úřad
HDO.	Hromadné dálkové ovládání
HR.	Hlavní rozvaděč
PR.	Podružný rozvaděč
ind.	Induktivní charakter účinníku
kap.	Kapacitní charakter účinníku

Úvod

Problematika kompenzace jalového výkonu je a pravděpodobně i nadále bude velmi důležitá, protože za příliš velký odběr jalové energie, resp. za nedodržení účinníku v předepsaném pásmu 0,95 až 1, jsou Energetickým regulačním úřadem stanoveny velkoodběratelům elektrické energie procentní cenové přírážky. Přírážka může dosáhnout i 100 %, pokud je účinník velmi nízký. S účinností od 1. 1. 2013 je přírážka 100 % účtována, pokud je účinník nižší než 0,599. Dalším negativem je, že v důsledku přenosu jalové energie se zvyšuje zdánlivý proud, který protéká vedením. To má za následek zvětšení ztrát ve vedení, a tedy větší platbu za odebranou energii.

Především z těchto dvou důvodů je důležité, aby podnik, který má při odběru el. energie špatný účinník, zvážil pořízení kompenzačního zařízení. Je – li kompenzační zařízení správně navrženo a správně funguje, tak je účinník udržován v předepsaných mezích a odběratel je zcela oprostěn od cenové přírážky za nedodržení účinníku, takže se v některých případech ušetří nemalé finanční částky.

Hlavním cílem této práce je navrhnout vhodné kompenzační zařízení pro firmu Václav Chmela – Galvanovna s. r. o, se sídlem v Písku. Firma se zabývá povrchovou úpravou kovů. Při návrhu vycházím z podkladů, které mi byly dány k dispozici, tj. z revizní zprávy a z měsíční faktury za odebranou energii. Dále jsem měl možnost zjistit si štítkové údaje spotřebičů přímo v provozních prostorech firmy.

Návrh kompenzace budu řešit výpočtovou metodou, takže vycházím ze štítkových údajů spotřebičů a z hodnoty součinitele soudobosti β . Tato metoda se používá pro stanovení kompenzačního výkonu pro nově budovaný podnik. V mém případě nebylo možno provést měření, ani nebyly k dispozici naměřené hodnoty, z kterých bych kompenzační výkon určil, proto jsem zvolil pro stanovení potřebného kompenzačního výkonu právě již zmíněnou výpočtovou metodu. Úroveň znečištění sítě podniku vyššími harmonickými je 18,85 %, od hodnoty znečištění 20 % je doporučeno instalovat chráněné kompenzační zařízení. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl provést návrh jak klasické, tak i chráněné varianty kompenzace.

Důležitou otázkou, zejména pro investora, je návratnost vynaložených investic do kompenzačního zařízení. Proto tuto otázku v závěru práce také řeším. Bude stanovena předpokládaná návratnost investic pro všechny navržené varianty kompenzace, což může být do jisté míry určité vodítko pro volbu konkrétní varianty, která se bude nakonec realizovat.

1 Základní pojmy a vztahy

Pro vysvětlení jednotlivých výkonů a dalších pojmů, které souvisí s problematikou kompenzace, je vhodné připomenout chování pasivních prvků v obvodech s harmonickým průběhem napětí a proudu. Harmonický průběh znamená, že se daná veličina mění v čase podle funkce sinus nebo kosinus. V praxi se samozřejmě vyskytují i neharmonické periodické nebo neperiodické průběhy, řešení této problematiky je však nejen z matematického hlediska složitější.

1.1 Prvky R, L, C ve střídavém obvodu s harmonickými průběhy

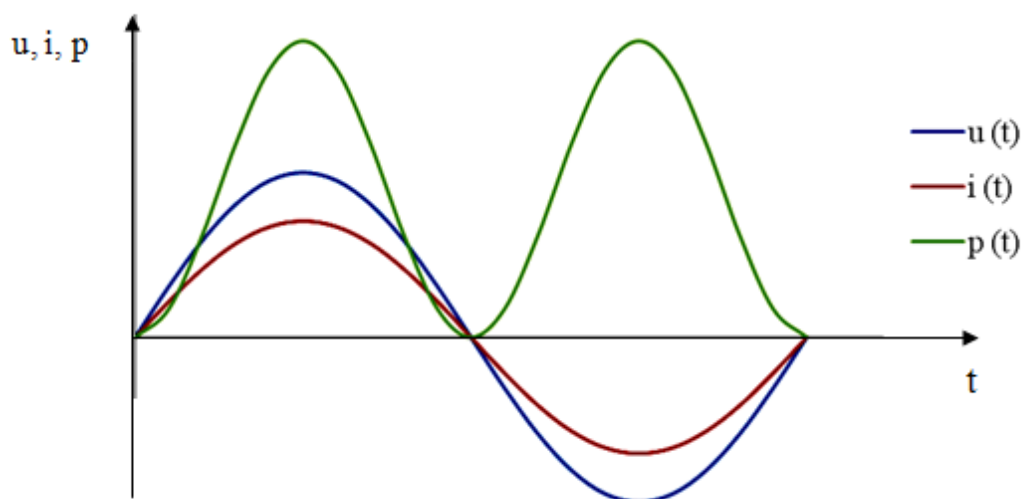
Uvažujme střídavý harmonický zdroj, jehož svorkové napětí a proud jsou popsány následujícími vztahy:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

$$p(t) = i(t) \cdot u(t) = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t \quad (1.3)$$

K tomuto zdroji je připojen ideální rezistor, tj. uvažujeme pouze jeho činný odpor. V tomto obvodu je proud ve fázi s napětím, neboli proud a napětí prochází nulou ve stejném časovém okamžiku, viz obr. 1.1. Při zobrazení veličin ve fázorovém diagramu by napětí a proud ležely v jedné přímce.



Obr. 1.1 Průběh napětí, proudu a činného výkonu na rezistoru

Jak lze vidět, výkon se pohybuje pouze v kladných hodnotách a kmitá s dvojnásobnou frekvencí oproti frekvenci napětí. Lze tedy říci, že elektrická energie je trvale dodávána zdrojem do obvodu, v tomto případě se elektrická energie přemění v činném odporu na teplo, jde o nevratný proces. Práce, kterou dodá zdroj do obvodu, je určena plochou pod křivkou výkonu.

Jestliže chceme určit střední výkon na rezistoru za periodu T , pak dosadíme do vztahu pro střední hodnotu výkonu za okamžitý výkon p z rovnice (1.3).

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m \cdot I_m \cdot \omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sin^2 \omega t \cdot dt = \\
 &= \frac{U_m \cdot I_m \cdot \omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \cdot dt = \frac{U_m \cdot I_m \cdot \omega}{4\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (1 - \cos 2\omega t) \cdot dt = \\
 &= \frac{U_m \cdot I_m \cdot \omega}{4\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} dt - \frac{U_m \cdot I_m \cdot \omega}{4\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos 2\omega t \cdot dt = \frac{U_m \cdot I_m}{2} - \frac{U_m \cdot I_m}{2T} \cdot 0 = \\
 &= \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} = U \cdot I
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Nyní připojme ke zdroji ideální indukčnost, vztahy pro napětí a proud mají pak tento tvar:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \tag{1.5}$$

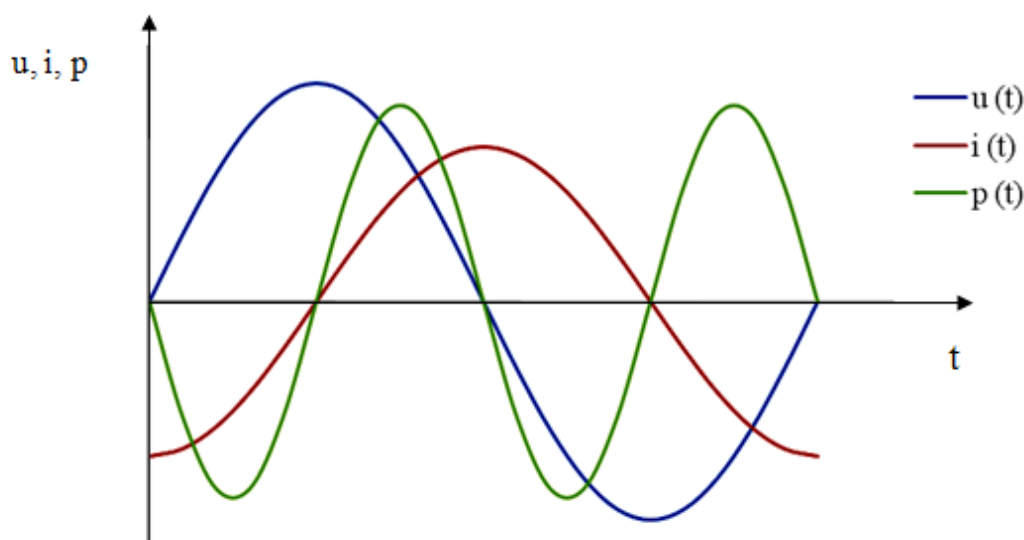
$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \tag{1.6}$$

$$p(t) = i(t) \cdot u(t) \tag{1.7}$$

Oproti obvodu s rezistorem přibyla ve vztahu pro proud proměnná φ , která značí fázový posuv mezi napětím a proudem. Fázový posuv znamená, že sinusovka napětí a proudu neprochází nulou ve stejný okamžik, ale s určitým časovým zpožděním.

Na obr. 1.2 předbíhá napětí o 90° proud, což je v časovém měřítku čtvrtina periody, pro síťovou frekvenci 50 Hz tedy 5 mS. Fázový posuv napětí před proudem v našem případě znamená, že do obvodu je zapojena ideální indukčnost. Reálná cívka nebo tlumivka má fázový posun proudu a napětí vždy menší než 90° , protože nevykazuje pouze čistou indukčnost, ale i určitý parazitní odpor a kapacitu. Okamžitý výkon opět kmitá dvojnásobnou

frekvencí, ale nabývá i záporných hodnot, znaménko výkonu se mění každou čtvrtinu periody. Je – li výkon kladný, tak zdroj dodává energii cívce a ta ji akumuluje ve svém magnetickém poli, cívka se chová jako pasivní prvek, napětí a proud cívkou mají shodnou orientaci. Při záporné okamžité hodnotě výkonu se energie naakumulovaná v magnetickém poli cívky vrací zpět do zdroje, cívka se nyní chová jako aktivní prvek neboli zdroj. Když proud klesne na nulu, není v magnetickém poli cívky již žádná energie, pak ale proud opět roste a celý cyklus přelévání výkonu mezi magnetickým polem cívky a zdrojem se opakuje a u ideální cívky je bezztrátový.



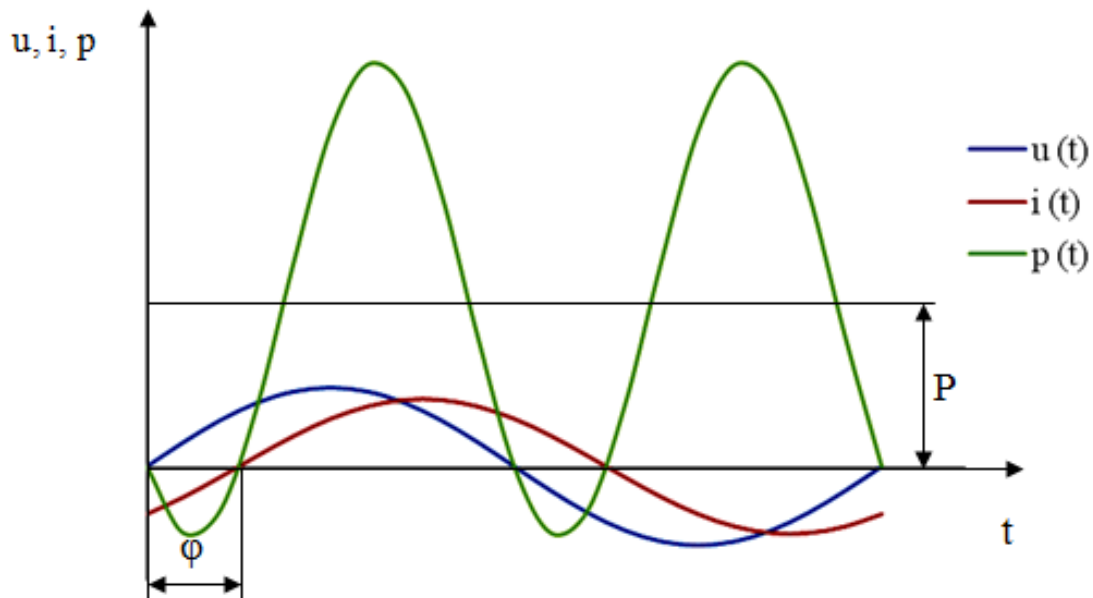
Obr. 1.2 Průběh napětí, proudu a činného výkonu na ideální cívce

Při zapojení ideálního kondenzátoru do obvodu by situace byla obdobná, s tím rozdílem, že proud předbíhá napětí o 90° , protože kondenzátorem musí téct nejprve proud, aby byl nabit na jmenovité napětí. Průběh okamžitého výkonu by byl shodný jako v případě s indukčností, jen posunutý o čtvrtinu periody. Energie přijímaná ideálním kondenzátorem ze zdroje se hromadí v jeho elektrickém poli a opět se beze ztrát cyklicky přelévá mezi zdrojem a kondenzátorem. Jak bylo ukázáno, kondenzátor a cívka mají schopnost po určitou dobu akumulovat elektrickou energii, proto je také označujeme jako akumulární prvky.

Střední hodnota výkonu, tj. činný výkon u ideální cívky a kondenzátoru je nula, na těchto prvcích vzniká jen jalový výkon, viz kap. 1.2.2. Této vlastnosti využíváme v praxi, kdy zdrojem jalového výkonu např. pro asynchronní elektromotor může být kondenzátor, podrobné vysvětlení je v kap. 3.1. Na skutečném kondenzátoru nebo tlumivce vzniká při provozu i činný výkon, tento výkon je však nežádoucí a je v praxi označován jako ztrátový výkon. Je vždy mnohem menší než jmenovitý jalový výkon prvku.

1.2 Definování výkonů v harmonickém obvodu

Bylo vysvětleno, jak se základní pasivní¹ prvky chovají v obvodu s harmonickým zdrojem. Nyní tedy můžeme uvažovat obecný lineární dvojpól, který je tvořen kombinací R, L, C prvků. Tento dvojpól lze popsat komplexní impedancí o velikosti Z a úhlu φ .



Obr. 1.3 Průběh napětí, proudu a okamžitého výkonu na dvojpólu s induktivním charakterem

Uvažujme, že impedance dvojpólu má induktivní charakter, protože spotřebiče s induktivním charakterem jsou v průmyslu častější než spotřebiče s kapacitním charakterem. Pak pro proud, napětí a výkon platí rovnice 1.5 až 1.7. Platí zde rovněž, že v čase kdy je $p > 0$ jde energie ze zdroje do dvojpólu a v čase kdy $p < 0$ jde energie z dvojpólu do zdroje.

Okamžitý výkon lze vyjádřit po matematických úpravách rovnice (1.7) následujícím způsobem, viz [13]:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \quad (1.8)$$

Z tohoto vztahu vidíme, že okamžitý výkon má konstantní složku $UI \cos \varphi$ posunující střídavou složku $UI \cos(2\omega t - \varphi)$, kmitající dvojnásobkem kmitočtu sítě, nad vodorovnou osu. Pro úpravu bylo použito matematické pravidlo:

$$\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} [\cos(x - y) - \cos(x + y)] \quad (1.9)$$

¹ Prvky L a C se mohou chovat i jako aktivní, viz kap. 1.1. Zde je však označujeme jako pasivní.

Pro odvození výkonu za dobu T nejprve upravíme rovnici (1.7) dosazením za $u(t)$ a $i(t)$ z rovnic (1.5) a (1.6).

$$\begin{aligned}
 p &= U_m I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U_m I_m \cdot \sin \omega t \cdot (\sin \omega t \cdot \cos \varphi - \cos \omega t \cdot \sin \varphi) = & (1.10) \\
 &= U_m I_m (\sin^2 \omega t \cdot \cos \varphi - \sin \omega t \cdot \cos \omega t \cdot \sin \varphi) \\
 &= U_m I_m \left[\frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) \cdot \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi \right] = \\
 &= \frac{1}{2} U_m I_m [(1 - \cos 2\omega t) \cdot \cos \varphi - \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi]
 \end{aligned}$$

Nyní provedeme dosazení do vztahu pro střední hodnotu výkonu:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{1}{2} U_m I_m [(1 - \cos 2\omega t) \cdot \cos \varphi - \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi] \cdot dt = & (1.11) \\
 &= \frac{U_m I_m \omega}{4\pi} \left[\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos \varphi \cdot dt - \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos 2\omega t \cdot \cos \varphi \cdot dt - \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi \cdot dt \right] = \\
 &= \frac{U_m I_m \omega}{4\pi} \left[\cos \varphi \cdot [t]_0^{\frac{2\pi}{\omega}} - \cos \varphi \cdot \left[\frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right]_0^{\frac{2\pi}{\omega}} + \sin \varphi \cdot \left[\frac{\cos 2\omega t}{2\omega} \right]_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \right] = \\
 &= \frac{U_m I_m \omega}{4\pi} \left[\cos \varphi \cdot \frac{2\pi}{\omega} - \cos \varphi \cdot 0 + \sin \varphi \cdot 0 \right] = \frac{U_m I_m}{2} \cdot \cos \varphi = \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} \cdot \cos \varphi = \\
 &= U \cdot I \cdot \cos \varphi
 \end{aligned}$$

Porovnáme – li tento výsledek s výsledkem pro střední výkonu u rezistoru, viz rov. (1.4), vidíme, že zde přibyl výraz $\cos \varphi$. Tento výraz se nazývá účinník a vystupuje ve vztazích pro činný výkon ve střídavém obvodu se zátěží, která nemá čistě odporový charakter.

1.2.1 Činný výkon

Známe – li časový průběh okamžitého výkonu, pak činný výkon lze určit jako ekvivalentní konstantní hodnotu výkonu P (viz obr. 1.3), jenž během jedné periody přenesl stejné množství energie jako proměnný okamžitý výkon p . Jinými slovy řečeno, činný výkon je střední hodnota průběhu okamžitého výkonu. Protože střídavá složka v rov. (1.8) má střední hodnotu nulovou, lze přepsat rov. (1.8) na známý tvar:

$$P = UI\cos\varphi \quad (1.12)$$

Jelikož činný výkon je střední hodnotou okamžitého výkonu, lze ho odvodit i tímto způsobem, což je dokázáno v kap. 1.2, v rovnici (1.11).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI\cos\varphi \quad (1.13)$$

Okamžitý činný výkon má pulzující průběh a je vždy kladný, protože je dodáván zdrojem do spotřebiče, opačný směr přenosu není možný. Jestliže elektrický obvod obsahuje pouze ideální akumulární prvky (kondenzátor nebo cívka), pak v tomto obvodu činný výkon nevzniká.

Činný výkon lze také definovat jako fyzikální veličinu, vyjadřující množství elektrické energie přenesené za jednotku času do spotřebiče. Tato energie se ve spotřebiči nevratně mění na jiný druh energie, např. tepelnou, mechanickou apod.

$$P = \frac{A}{T} \quad (1.14)$$

1.2.2 Jalový výkon

Dle [5] ho definujeme jako amplitudu okamžitého jalového výkonu:

$$Q = \max|q(t)| = UI\sin\varphi \quad (1.15)$$

Jalový výkon je mírou elektrické energie, která vzniká v akumulárních prvcích a periodicky osciluje mezi zdrojem a spotřebičem. U kondenzátoru se energie hromadí v jeho elektrickém poli, u cívky potom v jejím magnetickém poli. Takto nahromaděná energie jde pak v další čtvrtině periody zpět do zdroje. Na rozdíl od okamžitého činného výkonu, může okamžitý jalový výkon nabývat i záporných hodnot. Jak je uvedeno v [13], tak jalový výkon je vlastně střídavou složku okamžitého výkonu a jeho střední hodnota je nulová.

Definovat jalový výkon obdobnou rovnicí k rov. (1.14) u činného výkonu nelze, protože jalový výkon nekoná práci. Přesto však je tento výkon nezbytný pro spotřebiče pracující s magnetickým polem, jako např. asynchronní elektromotory a transformátory. Jeho přenos vedením způsobuje Jouleovy ztráty a úbytky napětí, proto se tento výkon snažíme vykompenzovat, o čemž budou pojednávat další kapitoly.

1.2.3 Zdánlivý výkon

Je to součin efektivních hodnot napětí a proudu.

$$S = UI \quad (1.16)$$

Zdánlivý výkon byl zaveden z výpočtových důvodů, provádí se podle něj výkonové dimenzování jednotlivých částí rozvodných zařízení, jako jsou transformátory, přípojnice, vedení apod.

1.2.4 Deformační výkon

Tento výkon vzniká v neharmonických obvodech a představuje podobně jako jalový výkon neúčinnou složku zdánlivého výkonu. Vyvolává opět ztráty v síti a snižuje její využitelnost. V neharmonických obvodech platí:

$$S \geq \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.17)$$

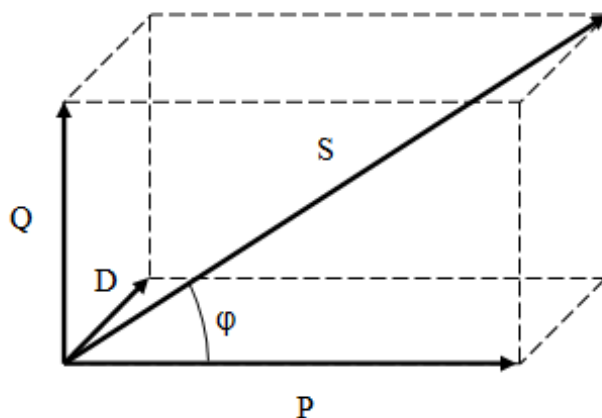
Zdánlivý výkon se udává ve tvaru:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.18)$$

Deformační výkon je definovaný:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (1.19)$$

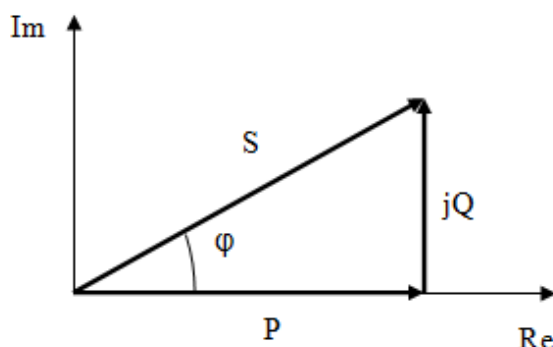
Deformační výkon má jednotkou voltampéry deformační. Obdobně, jako zobrazujeme výkony pomocí trojúhelníku výkonů v harmonických obvodech, tak zde můžeme nakreslit tzv. kvádr výkonů zobrazující jednotlivé výkony. Zdánlivý výkon je zde tělesová úhlopříčka kvádrů o stranách, jejichž velikosti udávají činný, jalový a deformační výkon.



Obr. 1.4 Vztah mezi výkony v neharmonických obvodech [5]

1.3 Vztahy mezi výkony, účinník

Graficky lze interpretovat činný, jalový a zdánlivý výkon tzv. trojúhelníkem výkonů, obr. 1.5.



Obr. 1.5 Trojúhelník výkonů [13]

Protože trojúhelník je pravoúhlý, platí zde následující vztahy:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \quad (1.20)$$

Výraz $\cos \varphi$ se nazývá účinník, je stanoven jako poměr činného a zdánlivého výkonu. Je to bezrozměrná veličina a může nabývat pouze hodnot od 0 do 1, bez ohledu na znaménko fázového posuvu, protože \cos je sudá funkce. Pro rozlišení induktivní a kapacitní zátěže se charakter zátěže uvede v závorce, např. $\cos \varphi = 0,8$ (ind.). V obvodech s čistě odporovou zátěží je fázový posuv nula, jalový výkon zde nevzniká a tím pádem je zde $\cos \varphi = 1$. Toto je v praxi ideální stav, ke kterému se snažíme pomocí kompenzace jalového výkonu co nejvíce přiblížit. Je důležité poznamenat, že definici účinníku jako $\cos \varphi$ lze použít pouze v harmonických obvodech. V obvodech s obecně periodickými průběhy se zavádí definice účinníku takto:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.21)$$

Mluvíme pak o skutečném účinníku, který respektuje i vliv vyšších harmonických proudů a napětí. V neharmonických obvodech není $\cos \varphi$ definován a nelze jej používat, proto se zavedlo označení λ . V zahraniční literatuře se též užívá označení PF (power factor). Jestliže máme na mysli účinník např. celého průmyslového závodu, pak označení tohoto účinníku jako $\cos \varphi$ není zcela správné, protože nelze předpokládat harmonický průběh

odebíraných proudů. Naopak u třífázového asynchronního elektromotoru, což je za normálních okolností symetrický spotřebič odebírající sinusové proudy, se výraz $\cos \varphi$ uvádí na štítku motoru.

V této práci je však pro účinník používán výraz $\cos \varphi$, a to i při výpočtech v praktickém návrhu kompenzace. Rozhodl jsem se tak z důvodu lepší přehlednosti výpočtů a také proto, že navrhuji pouze klasickou kompenzaci, kterou se kompenzuje pouze první harmonická proudů.

1.4 Účinník v třífázovém obvodu

Pro definování výkonů a odvození účinníku byl dosud pro jednoduchost uvažován jednofázový systém. Především v průmyslu se ale používají většinou třífázové spotřebiče, také rozvody jsou projektovány jako třífázové. Z tohoto důvodu je zde proto naznačena i problematika účinníku ve třífázových systémech. Tato kapitola je zpracovaná na základě literatury [13].

Jestliže chceme zjistit účinník ve třífázovém obvodu, tak kromě tvaru křivky proudu a napětí musíme ještě zjistit, zda je třífázová soustava symetrická a to z hlediska jak odebíraných proudů, tak napětí. Soustava je symetrická, jestliže veličiny každé fáze mají stejnou amplitudu a vzájemný fázový posuv 120° . V praxi bývá nejčastější případ, kdy má napájecí soustava symetrická sinusová napětí, ale odebírané proudy jsou nesymetrické a nesinusové. V obecné nesymetrické soustavě platí, že celkový činný a zdánlivý výkon je dán součtem výkonů v jednotlivých fázích a, b, c :

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c \quad (1.22)$$

$$S = S_a + S_b + S_c = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c \quad (1.23)$$

V případě napětově symetrické soustavy dojde ke zjednodušení, neboť velikosti napětí se rovnají a můžeme psát:

$$U_a = U_b = U_c = U \quad (1.24)$$

$$P = U(I_a \cos \varphi_a + I_b \cos \varphi_b + I_c \cos \varphi_c) \quad (1.25)$$

$$S = U(I_a + I_b + I_c) \quad (1.26)$$

Účinník je definován jako poměr činného a zdánlivého výkonu, takže platí:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_a \cos \varphi_a + I_b \cos \varphi_b + I_c \cos \varphi_c}{I_a + I_b + I_c} \quad (1.27)$$

Když je třífázový systém proudově i napětově symetrický, platí tedy rov. (1.24) a také

$$I_a = I_b = I_c = I \quad (1.28)$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi \quad (1.29)$$

Teprve v tomto případě můžeme vyjádřit výkony a účinník známými vztahy:

$$P = 3U_f I_f \cos\varphi = \sqrt{3}UI \cos\varphi; \quad Q = 3U_f I_f \sin\varphi = \sqrt{3}UI \sin\varphi; \quad S = 3U_f I_f = \sqrt{3}UI \quad (1.30)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos\varphi \quad (1.31)$$

Jestliže chceme účinník ovlivnit, resp. zlepšit, tak máme v podstatě dvě možnosti. První možnost je vhodnými změnami upravit způsob užívání strojů a zařízení, které mají vliv na celkový účinník podniku. Nemusí se přitom jednat jen o úpravu provozu těchto strojů, ale je možno zvážit i jejich nahrazení za stroje, které budou mít lepší účinník. Tento způsob ovlivnění účinníku je popsán v kapitole 2.

Druhou možností jak zlepšit účinník je použití prostředků ke kompenzaci jalového výkonu, dnes zpravidla kompenzačních kondenzátorů. Podstata kompenzace je výroba jalové energie v blízkosti její spotřeby a nejsnáze se dosáhne paralelním připojením kondenzátoru ke spotřebiči. Použitím kompenzace je možno účinník zlepšit podstatně více než zmíněnou úpravou provozu, tento způsob má proto větší význam a v praxi je často používán. Princip kompenzace je vyložen v kap. 3.

2 Možnosti zlepšení účinníku bez kompenzace

Ne vždy je nutné pro zlepšení účinníku průmyslového závodu instalovat kompenzační zařízení, která jsou v některých případech poměrně nákladná. Pokud to charakter provozu dovolí, pak je možné provést po důkladném posouzení konkrétní situace ke zlepšení účinníku následující opatření:

2.1 Náhrada asynchronních elektromotorů za synchronní

Toto opatření je z hlediska investice značně nákladné, neboť synchronní motory jsou pro složitější konstrukci² dražší než asynchronní motory. Další nevýhodou je, že rozběh synchronních motorů je problematický. Proto se náhrada doporučuje až od výkonu zhruba 100 kW a pouze tam, kde převažuje trvalý chod zařízení. Kromě toho, že synchronní motor má větší účinnost, lze také pomocí jeho buzení měnit jalový výkon, který odebírá ze sítě. Jalový výkon je možno do sítě synchronním strojem i dodávat, o tomto způsobu zlepšení účinníku pojednává kap. 5.1.

2.2 Vhodná volba motoru

Obecně platí, že asynchronní motory pracují s nejlepším účinníkem i účinností v rozsahu 75% - 100% zatížení jmenovitým výkonem. Předimenzované motory, které jsou zatížené zhruba do 45 %, je účelné nahradit menšími motory, které budou lépe využity. Při zatížení motorů na 45 % až 75% je třeba zvážit, zda je výměna vhodná. Platí, že čím větší je výkon asynchronního motoru, tím větší odebírá jalový výkon pro svoji magnetizaci. Tento výkon je přibližně konstantní bez ohledu na to, je – li motor v chodu naprázdno nebo pracuje se zatížením.

Je také známo, že asynchronní motory s vinutou kotvou mají nižší účinník než motory s kotvou nakrátko [6]. Záměna za typ s kotvou nakrátko je výhodná nejen z hlediska zlepšení účinníku, ale i z hlediska spolehlivosti a jednodušší obsluhy. Kroužkové motory se dříve používaly pro možnost omezení spouštěcího proudu a zvětšení záběrného momentu, dnes je již vytlačily motory s kotvou nakrátko doplněné frekvenčním měničem. Toto opatření je proto možno v současné době považovat v naprosté většině podniků za splněné.

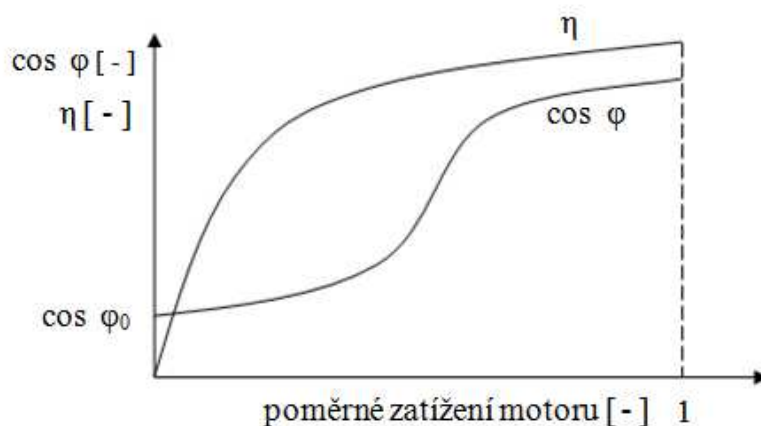
Porovnáme – li z hlediska účinníku pomaloběžné a rychloběžné motory, pak větší účinník mají motory rychloběžné, tedy motory dvoupólové nebo čtyřpólové, tj. motory, které mají synchronní rychlost 3000 ot/min. a 1500 ot/min. Tam kde jsou malé otáčky nutné, a technologie to dovolí, lze použít rychloběžný motor s vhodnou převodovkou.

² Synchronní stroj má na rotoru budící vinutí, je tedy třeba budícího zařízení, proto je konstrukce složitější než u asynchronního stroje. Statory obou strojů jsou principiálně shodné.

Zbývá poznamenat, že v současné době se již motory z ekonomických důvodů nenavrhují předimenzované, jako tomu bývalo v minulosti, takže výběr vhodného typu motoru, který nebude předimenzován, je vyřešen v podstatě již v projektu.

2.3 Omezení chodu naprázdno

Velikost účinníku a účinnosti není u asynchronních motorů konstantní, ale závisí především na zatížení elektromotoru. S klesajícím zatížením klesá účinnost i účinník. Nezátížený elektromotor odebírá proud pro svoji magnetizaci, představuje tak téměř výhradně indukční zatížení sítě, protože odebíraný činný proud potřebný na krytí mechanických ztrát je velmi malý. S rostoucím zatížením motoru roste i jeho činný příkon a poměr činného a jalového příkonu se zmenšuje, to vede na zmenšení hodnoty $\operatorname{tg} \varphi$ a na zvetšení, tj. zlepšení $\cos \varphi$. Typická hodnota účinníku motoru běžícího naprázdno je 0,25. Obdobná situace je při chodu transformátoru naprázdno, který se pro síť jeví jako indukční zátěž reprezentovaná magnetizační reaktancí v příčné větvi náhradního schématu, viz kap. 4.1.2.



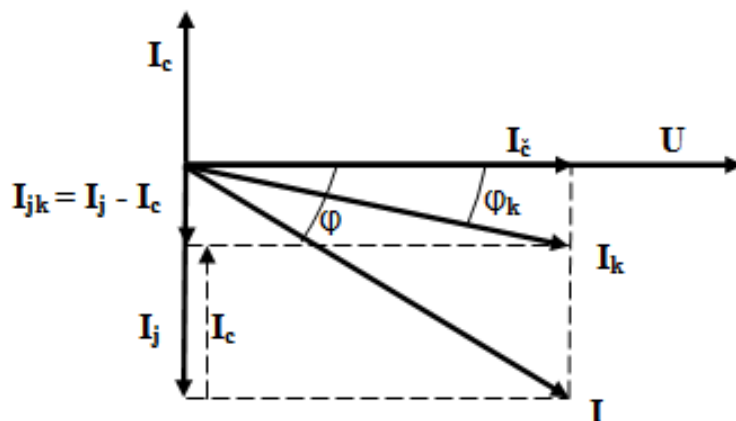
Obr. 2.1 Přibližný průběh účinnosti a účinníku v závislosti na zatížení elektromotoru

Jednoduché a přitom poměrně účinné opatření je málo zatížené motory, vybavené ručním přepínačem hvězda - trojúhelník přepnout, resp. ponechat zapnuté v poloze hvězda. Jestliže je satorové vinutí zapojené do hvězdy, tak výkon motoru klesne na třetinu. Třetinový výkon je někdy pro poháněné zařízení dostačující, nikdy však nesmí dojít k zastavení motoru vlivem sníženého momentu, což je důsledek přepnutí motoru do hvězdy, resp. je to důsledek poklesu napětí satorového vinutí.

3 Zlepšení účinníku pomocí kompenzace

3.1 Princip kompenzace

Jak již bylo řečeno, snaha o snížení jalové složky zdánlivého proudu, neboli dodání jalového výkonu v místě, nebo blízko jeho spotřeby je základní princip kompenzace jalového výkonu, neboli zlepšení účinníku.



Obr. 3.1 Fázorový diagram k vysvětlení principu kompenzace [6]

Na obr. 3.1 je zobrazen fázorový diagram pro případ vedení zatížené spotřebičem s induktivním, resp. odporově - induktivním charakterem. Tímto spotřebičem je v průmyslu nejčastěji asynchronní elektromotor, obecně lze tedy říci, že průmyslové podniky zatěžují síť odběrem jalového výkonu resp. proudu induktivního charakteru. Kdyby nebyla provedena kompenzace, pak by spotřebič odebíral celkový proud I s fázovým posunem φ . Provedeme – li kompenzaci paralelním připojením kondenzátoru, pak spotřebič bude odebírat celkový proud I_k při účinníku φ_k . Kapacitní proud I_c dodávaný kondenzátorem je pootočen o 180° proti induktivní složce proudu odebírané spotřebičem, tj. oba proudy leží v imaginární ose fázorového diagramu a je možno je odečíst. Jejich rozdíl je hodnota proudu I_{jk} , což je jalový proud po kompenzaci, který musí zdroj dodat. Je zřejmé, že tento proud je menší než byl proud I_j , který by zdroj musel dodat v případě, že by kompenzace provedena nebyla. Činná složka odebíraného proudu je před i po kompenzaci stejná. Z toho plyne, že snížením jalové složky proudu se zmenšil fázový posuv z hodnoty φ na hodnotu φ_k . Velikost zdánlivého proudu³ ve vedení mezi zdrojem a kompenzačním prvkem se zmenšila, protože se zmenšila jalová složka proudu. Tím se zároveň zlepšil i účinník v části vedení od zdroje ke kompenzátoru. Účinník spotřebiče však zůstal nezměněn, protože spotřebič musí odebírat stále stejný jalový proud před i po kompenzaci, rozdíl je pouze v tom, odkud je jalový výkon nebo jeho část dodána.

³ Zdánlivý proud je dán vektorovým součtem činné a jalové složky proudu.

3.2 Odvození velikosti kapacity kompenzačního kondenzátoru

Pro odvození velikosti kapacity kompenzačního kondenzátoru vycházíme z fázorového diagramu na obr. 3.1. Požadujeme, aby $I_c = I_j$ takže platí:

$$I_c = \frac{U}{X_c} = U\omega C; \quad I_j = I \sin\varphi \quad (3.1)$$

$$U\omega C = I \sin\varphi \quad (3.2)$$

$$C = \frac{I \sin\varphi}{\omega U} = \frac{Q}{\omega U^2} \quad (3.3)$$

Nyní odvodíme velikost kompenzačního jalového výkonu Q_c , kterou musí kondenzátor dodat:

$$\operatorname{tg}\varphi_k = \frac{I_{jk}}{I_{\check{c}}} = \frac{I_j - I_c}{I_{\check{c}}} = \frac{I \sin\varphi - I_c}{I \cos\varphi} = \operatorname{tg}\varphi - \frac{I_c}{I \cos\varphi} \quad (3.4)$$

$$I_c = I \cos\varphi (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) \quad (3.5)$$

$$Q_c = UI_c = UI \cos\varphi (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) = P (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) \quad (3.6)$$

Lze vyjádřit i vztah pro zmenšení ztrát po kompenzaci [3], z fázorového diagramu plyne:

$$I_{\check{c}} = I \cos\varphi = I_k \cos\varphi_k \quad (3.7)$$

Velikost zdánlivého proudu po kompenzaci tedy bude:

$$I_k = I \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_k} \quad (3.8)$$

Procentní snížení ztrát:

$$\Delta P_z = \frac{\Delta P - \Delta P_k}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{RI^2 - RI_k^2}{RI^2} \cdot 100 = \left(1 - \frac{I_k^2}{I^2}\right) \cdot 100 \quad (3.9)$$

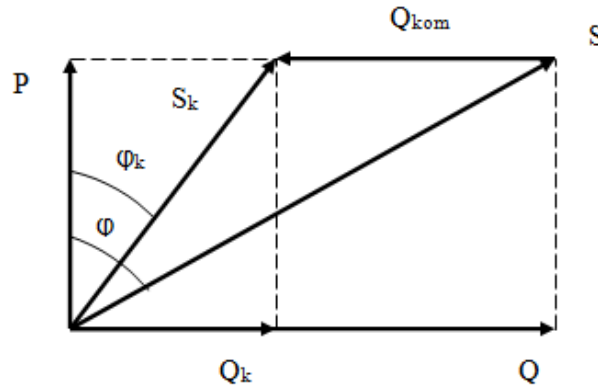
Po dosazení za proud I_k z rov. (3.8) dostaneme vyjádření ztrát použitím účinníku⁴ před a po kompenzaci:

$$\Delta P_z = \left(1 - \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_k}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.10)$$

⁴ Cos φ je účinník před kompenzací, cos φ_k účinník po kompenzaci.

3.3 Určení kompenzačního výkonu

Jestliže chceme zlepšit účinník na požadovanou hodnotu, tak musíme znát hodnoty těchto veličin: zdánlivý výkon S , činný výkon P a účinník před a po kompenzaci, tj. $\cos \varphi$ a $\cos \varphi_k$.



Obr. 3.2 Kompence na požadovaný účinník [6]

Z obrázku je zřejmé, že platí vztahy:

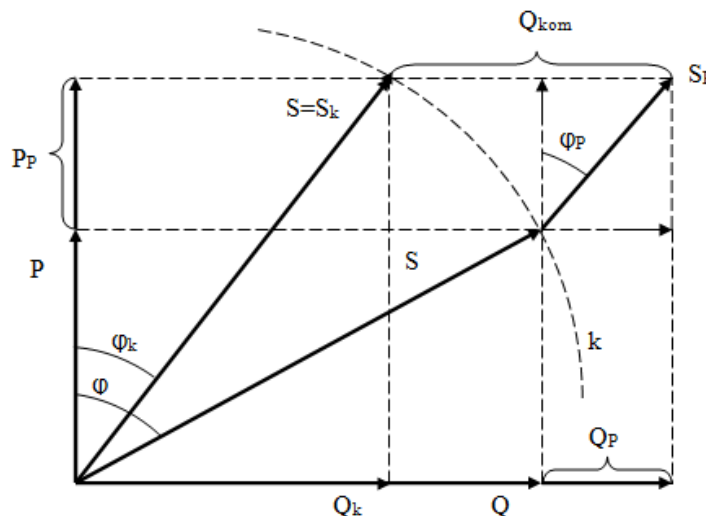
$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi \tag{3.11}$$

$$Q_k = P \cdot \operatorname{tg} \varphi_k \tag{3.12}$$

Kompenzační jalový výkon, který je nutné dodat:

$$Q_{kom} = Q - Q_k = P \cdot \operatorname{tg} \varphi - P \cdot \operatorname{tg} \varphi_k = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \tag{3.13}$$

Nyní uvažujme případ, kdy chceme zvětšit činný výkon, ale zachovat stejnou hodnotu zdánlivého výkonu. Tato situace nastane, např. když chceme na vedení připojit další spotřebič a průřez vedení má zůstat zachován, nesmí přitom dojít k přetížení vedení.



Obr. 3.3 Kompence pro zvětšení činného výkonu [6]

Máme spotřebič se zdánlivým výkonem S , činným výkonem P a účinníkem φ . Zdánlivý výkon požadujeme zachovat stejný, činný výkon se zvýší o hodnotu P_p , jelikož byl připojen další spotřebič, rovněž jalový výkon se zvětší o hodnotu Q_p . Protože ale musíme zachovat zdánlivý výkon S , musíme dodáním jalového výkonu Q_{kom} snížit hodnotu přenášeného jalového výkonu na velikost Q_k . Z obrázku 3. 3 můžeme odvodit vztahy pro výpočet.

Jednotlivé jalové výkony mají velikost:

$$Q = P \cdot tg\varphi; \quad Q_p = P_p \cdot tg\varphi_p; \quad Q_k = (P + P_p) \cdot tg\varphi_k \quad (3.14)$$

Účinník po kompenzaci:

$$\cos\varphi_k = \frac{P + P_p}{S} \quad (3.15)$$

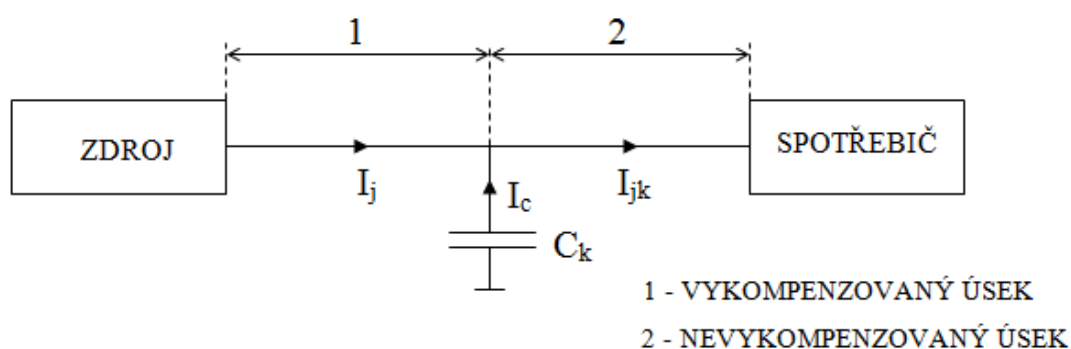
Jalový výkon, který musí kompenzátor dodat:

$$Q_{kom} = Q + Q_p - Q_k = P \cdot tg\varphi + P_p \cdot tg\varphi_p - (P + P_p) \cdot tg\varphi_k \quad (3.16)$$

Podmínkou realizovatelnosti takovéto kompenzace je, aby:

$$P + P_p \leq S \quad (3.17)$$

Závěrem této kapitoly můžeme tedy říci, že na kondenzátor lze pohlížet jako na spotřebič jalového výkonu kapacitního charakteru, nebo jako na zdroj jalového výkonu induktivního charakteru.



Obr. 3.4 kompenzovaná a nekompenzovaná část sítě

Připojení kondenzátoru se projeví pouze v části vedení mezi zdrojem a kondenzátorem. V okamžiku, kdy spotřebič odebírá ze sítě induktivní jalový výkon, kondenzátor do sítě jalový výkon dodává. To má za následek snížení celkového odběru jalového výkonu z části sítě před

kondenzátorem. Předpokládáme – li, že se činný výkon nemění, pak odebíraný zdánlivý výkon ze zdroje musí nutně klesnout a tím pádem klesne i odebíraný zdánlivý proud, který je pak z větší části tvořen pouze činnou složkou. Takže se zlepší účinník v místě před kompenzací a část vedení je tak lépe využita.

3.4 Přínosy kompenzace

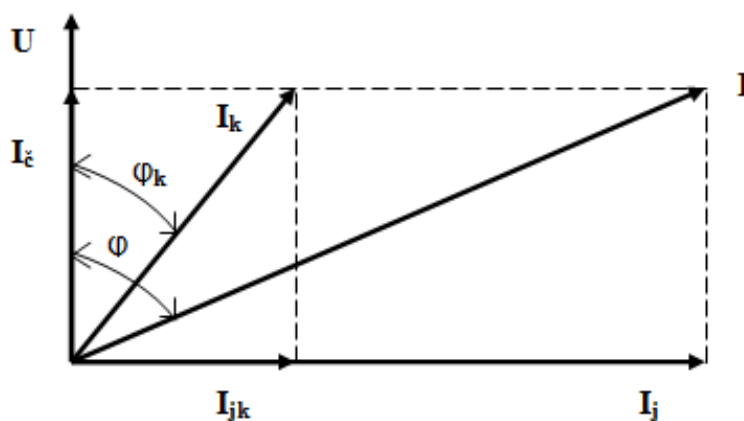
Jedním z nejdůležitějších požadavků na přenos a rozvod elektrické energie je hospodárnost. To znamená minimalizovat ztráty, tyto ztráty jsou ve velké míře způsobeny tepelnými ztrátami v činném odporu vedení⁵, které se ve třífázovém systému stanoví jako:

$$\Delta P = 3RI^2 \quad (3.18)$$

Je zřejmé, že tyto ztráty jsou způsobeny celkovým, neboli zdánlivým proudem a nikoliv jen jeho činnou složkou. Pro velikost zdánlivého proudu platí vztah:

$$I = \sqrt{I_c^2 + I_j^2} \quad (3.19)$$

Z rovnice 3.18 vidíme, že ztráty lze snížit buď zmenšením činného odporu vedení, nebo snížením zdánlivého proudu. Činný odpor vedení lze snížit zvětšením průřezu vodiče, což je ale v mnoha případech velmi nákladné nebo technicky náročné. Tato možnost se proto používá jen v omezené míře. Zbývá tedy zmenšit zdánlivý proud, což dle rovnice 3.19 dosáhneme snížením jalového proudu z hodnoty I_j na hodnotu I_{jk} viz obr. 3.5. Princip zmenšení jalového proudu I_j je vyložen v kapitole 3.1.



Obr. 3.5 Zmenšení zdánlivého proudu [6]

⁵ Činný odpor vedení najdeme pro konkrétní typ vedení v příslušných tabulkách, udává se v [Ω/km].

Platí zde vztahy:

$$I_{\xi} = I \cos \varphi; \quad I_j = I \sin \varphi \quad (3.20)$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{\xi}}{I_j} = \frac{P}{S} \quad (3.21)$$

Také prvky rozvodných zařízení se konstruují na velikost zdánlivého proudu. Je proto jasné, že dimenzování těchto prvků na zbytečně velký zdánlivý výkon by výrazně prodražilo celkovou investici. Zvýšením účinníku klesnou nároky zejména na vypínače, neboť při vyšším účinníku se snadněji přerušuje el. oblouk mezi kontakty vypínače, v podstatě se přiblížíme situaci, kdy vypínáme odporovou zátěž. Dle [6] jsou pořizovací náklady na rozvodné zařízení při účinníku 0,8 vyšší zhruba o 10%, při účinníku 0,6 o 45% a při účinníku 0,5 o 71%. Je – li provedena kompenzace, lze stávající rozvodná zařízení zatížit přenosem většího činného výkonu v podobě připojení dalších spotřebičů, aniž by bylo nutné rozvodné prvky dimenzovat na větší výkon.

Zdánlivý proud dále ovlivňuje úbytek napětí, což se řeší zejména v sítích nízkého napětí. Velikost napětí je v elektrizační soustavě lokální parametr a udržuje se bilancí jalových výkonů, v tzv. pilotních uzlech tím, že do těchto uzlů je injektován jalový výkon. Pro úbytek napětí na vedení, kde uvažujeme pouze podélné parametry⁶ R a X lze psát vztah:

$$\Delta U_f = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi = RI_{\xi} + XI_j \quad (3.22)$$

Snížením jalové složky proudu se sníží úbytek napětí.

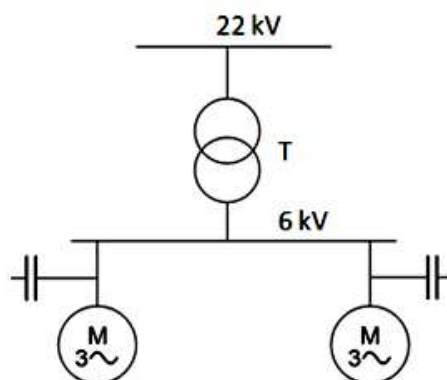
Rovněž synchronní generátory jsou ovlivněny potřebou jalového výkonu v síti, zvýší – li se spotřeba jalového výkonu, pak se musí zvýšit i budící proud generátoru, protože generátorem dodávaný jalový výkon je přímo úměrný budícímu proudu. Při menší spotřebě jalového výkonu tedy není třeba tak velký budící proud a proto jsou menší nároky na budič generátoru.

⁶ Zjednodušení v podobě uvažování pouze podélných parametrů vedení si můžeme obvykle dovolit při zjednodušených výpočtech v sítích na hladině vn a nn.

4 Druhy kompenzace dle umístění

4.1 Individuální kompenzace

Kompenzační prvek je připojen v těsné blízkosti spotřebiče. V současné době se nejvíce využívá ke kompenzaci jednotlivých asynchronních motorů na hladině vn, které mají vysoké časové využití a pracují s málo proměnlivým zatížením.



Obr. 4.1 Principiální zapojení individuální kompenzace

Největší výhodou individuální kompenzace je, že je vykompenzováno celé přívodní vedení až ke spotřebiči, jsou zde proto největší úspory z hlediska ztrát. Výkon kondenzátorové baterie se nereguluje, protože je navržen podle daného zařízení. Z toho plyne, že tento způsob je jednodušší a provozně spolehlivější než ostatní způsoby kompenzace. Nevýhoda je, že když spotřebič stojí, kompenzační výkon kondenzátorové baterie nelze využít. Od individuální kompenzace lze upustit v případě, že časové využití spotřebiče menší než cca 1000 h/rok, nebo by výkon navržené kondenzátorové baterie byl menší než 1 kVAr [6]. Při proměnlivém zatížení také hrozí překompenzování, proto je tento způsob použitelný pro spotřebiče které představují málo se měnící nebo konstantní zátěž. Takovým spotřebičem jsou např. zářivková a výbojková svítidla. Pro správnou funkci je v těchto svítidlech zařazena tlumivka, což by při nekompenzování znamenalo velmi nízký účinník. Proto je zde účinník kompenzován na hodnotu minimálně $\cos\varphi = 0,95$ již při výrobě a to zapojením kondenzátoru do přívodu mezi fází a střední vodič. Velikost kondenzátoru bývá v řádech mikrofaradů a jeho správné přiřazení k příslušné zářivce nalezneme v katalogu výrobce. Moderní zářivková svítidla již mívají elektronický předřadník, takže provádět kompenzaci kondenzátorem není třeba. Není zde totiž tlumivka, která by zhoršovala účinník.

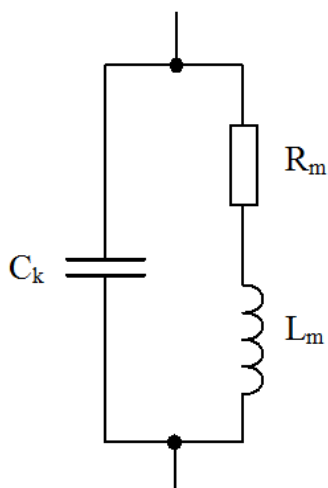
V praxi se ale používá tento vztah:

$$Q_{kom} \leq 0,9 \cdot Q_{0j} \leq 0,9 \cdot \sqrt{3} U_n I_{0j} \quad (4.2)$$

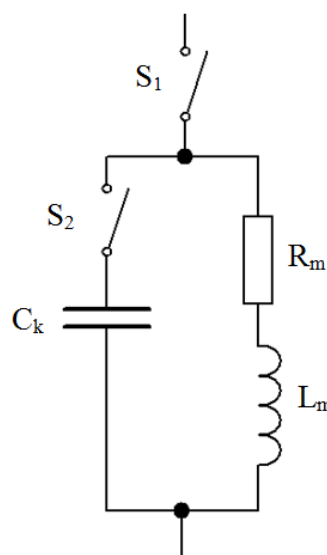
Přičemž pro jalovou složku proudu naprázdno platí:

$$I_{0j} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = \frac{i_0 \%}{100} \cdot I_n \cdot \sin \varphi_0 \quad (4.3)$$

Kompenzační kondenzátor se tedy navrhuje na 90% jalového příkonu motoru ve stavu naprázdno, což znamená přibližně na 55% jalového příkonu při jmenovitém zatížení. Tento postup se v praxi osvědčil, neboť je omezen nebezpečným jevem tzv. samonabuzení motoru při jeho odpojení od sítě. Pro vysvětlení tohoto jevu si můžeme asynchronní motor zjednodušeně představit jako $R - L$ zátěž, neboli sériové spojení indukčnosti a odporu, kompenzační kondenzátor je pak připojen k těmto prvkům paralelně, jak je nakresleno na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Představa asynchronního elektromotoru s kompenzačním kondenzátorem



Obr. 4.4 Asynchronní elektromotor s kompenzačním kondenzátorem a stykači

Při vypnutí motoru se jeho rotor setrvačností nějakou dobu otáčí. Kondenzátor, který byl nabit, se nyní vybíjí přes statorové vinutí motoru, takže pro motor představuje zdroj jalového proudu, kterým se motor magnetizuje. Protože rotorová frekvence se s otáčkami mění, tak se mění i hodnota indukčnosti L_m a při určitých otáčkách nastane stav, kdy se velikost kapacitní reaktance kondenzátoru rovná induktivní reaktanci motoru. V tomto okamžiku dojde k paralelní rezonanci a kondenzátor se velmi rychle vybije přes statorové vinutí. Rotor se prudce zabrzdí, takže vznikne mechanický ráz. Tato situace je proto

nebezpečná z hlediska mechanického namáhání rotoru a hřídele. Kromě toho může vzniknout přepětový ráz, který ohrožuje vinutí motoru i samotný kondenzátor [13]. U velkých motorů se proto používá zapojení (obr. 4.4), které zabezpečí odpojení kondenzátoru od motoru a tím znemožnění vzniku samonabuzení. Nejprve vypne stykač S_2 a poté stykač S_1 .

Pro úplnost je zde uvedena tabulka převzatá z [3] která slouží pro rychlé orientační stanovení hodnoty kompenzačního kondenzátoru podle výkonu motoru.

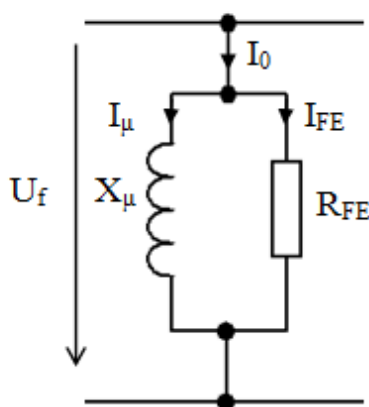
Tab. 4.1 Přiřazení kompenzačního kondenzátoru podle výkonu motoru [3]

Výkon motoru [kW]	3	4	7,5	11	15	20	30	37	50	75	100
Výkon kondenzátoru [kVAr]	1	2	3	4	5	7	10	12	15	20	24

Tabulka v podstatě přibližně vyjadřuje zjednodušenou skutečnost, že jalový výkon kompenzačního kondenzátoru by měl být zhruba třetinový oproti činnému výkonu motoru. U motorů velkých výkonů však zpravidla v katalogu nalezneme procentní hodnotu proudu naprázdno, nebo přímo proud naprázdno, takže výkon kompenzačního kondenzátoru je potom vhodnější navrhnout dle vztahu 4.2.

4.1.2 Individuální kompenzace transformátoru

Transformátory kompenzujeme jen pro stav naprázdno, protože v tomto stavu je jejich účinnost nejhorší ($\cos \varphi_0 = 0,1 \div 0,2$), neboť transformátor naprázdno představuje téměř čistě induktivní zátěž, která potřebuje jalový výkon pro svoji magnetizaci, tento jalový výkon je proto nutné při kompenzaci hradit z kondenzátoru. Pro lepší představu vyjdeme z náhradního schématu transformátoru. Ve stavu naprázdno hraje hlavní roli příčná impedance transformátoru.



Obr. 4.5 Příčné prvky v náhradním schématu transformátoru

Příčná impedance je mnohem větší než rozptylová reaktance primárního vinutí. Činný odpor primárního vinutí je naopak v porovnání s rozptylovou reaktancí velmi malý. Příčná impedance je v náhradním schématu tvořená paralelním spojením magnetizační reaktance a odporu modelujícího ztráty v železe, pro úvahy týkající se kompenzace můžeme uvažovat pouze magnetizační reaktanci, pak lze tvrdit, že magnetizační proud I_μ je téměř stejně velký jako celkový proud naprázdno I_0 .

$$I_\mu \doteq I_0 \doteq \frac{i_0\%}{100} \cdot I_n \quad (4.4)$$

Jalový příkon transformátoru naprázdno lze vyjádřit jako:

$$Q_0 = 3U_{nf}I_0 = 3U_{nf}I_n \cdot \frac{i_0\%}{100} = S_{nt} \cdot \frac{i_0\%}{100} \quad (4.5)$$

kompenzační výkon pro individuální kompenzaci se volí menší nebo rovný jalovému příkonu naprázdno Q_0 :

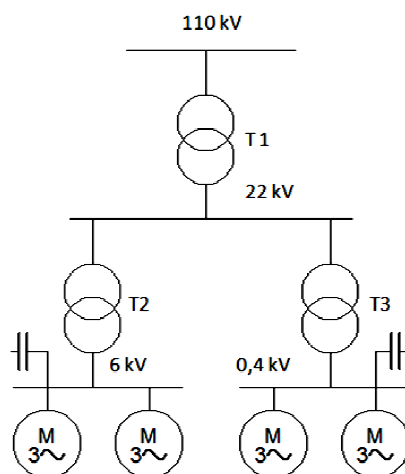
$$Q_{kom} \leq Q_0 \quad (4.6)$$

Hodnoty S_{nt} a $i_0\%$ jsou uvedeny na štítku transformátoru. Menší hodnoty proudu naprázdno jsou pro transformátory s orientovanými plechy, proto dle vztahu (4.5) vychází pak kompenzační výkon kondenzátoru pro tyto transformátory menší, než u transformátorů s neorientovanými plechy, toto je zřejmé i z tab. 1, převzaté z [1]. Tabulka je z důvodu velikosti umístěna v příloze č. 1. Kompenzační kondenzátor se zapojuje mezi průchodky a vypínač na sekundární straně transformátoru. Jak je uvedeno v [3], tak kondenzátor připojený na svorky transformátoru se musí vhodně jistit. Jištění musí být provedeno výkonovými pojistkami na pojistkových spodcích nebo v pojistkových odpínačích. Je to z důvodu velkého zkratového výkonu ihned za transformátorem v místě připojení kondenzátoru. Kondenzátor se umísťuje do prostoru transformátorového stání, nebo je – li transformátor na venkovním sloupu, tak je kondenzátor umístěn na tomto sloupu.

4.2 Skupinová kompenzace

Skupinovou kompenzací kompenzujeme skupinu spotřebičů, které jsou napájeny ze stejného rozvaděče. Kondenzátorová baterie je připojena na přípojnice tohoto rozvaděče, část vedení od rozvaděče ke spotřebičům je tak odlehčena, resp. vykompenzována. Využití kompenzačního výkonu je zde lepší než u individuální kompenzace, ale nelze se obejít bez

automatické regulace jalového výkonu podle výkonu současně běžících spotřebičů. Kondenzátory musí mít rovněž svůj stykač a jištění.

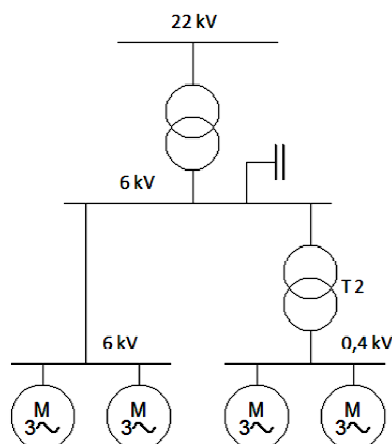


Obr. 4.6 Principiální zapojení skupinové kompenzace

Kompenzační výkon se navrhuje nikoliv na instalovaný výkon spotřebičů, ale podle soudobého odebíraného příkonu spotřebičů, tj. s respektováním činitele soudobosti β . Prostorová náročnost tohoto řešení je menší, protože kondenzátory jsou umístěny vždy v příslušném kompenzačním rozvaděči. Použití tohoto způsobu kompenzace je např. pro skupiny menších asynchronních motorů na nízkém i vysokém napětí s menším časovým využitím [6].

4.3 Centrální kompenzace

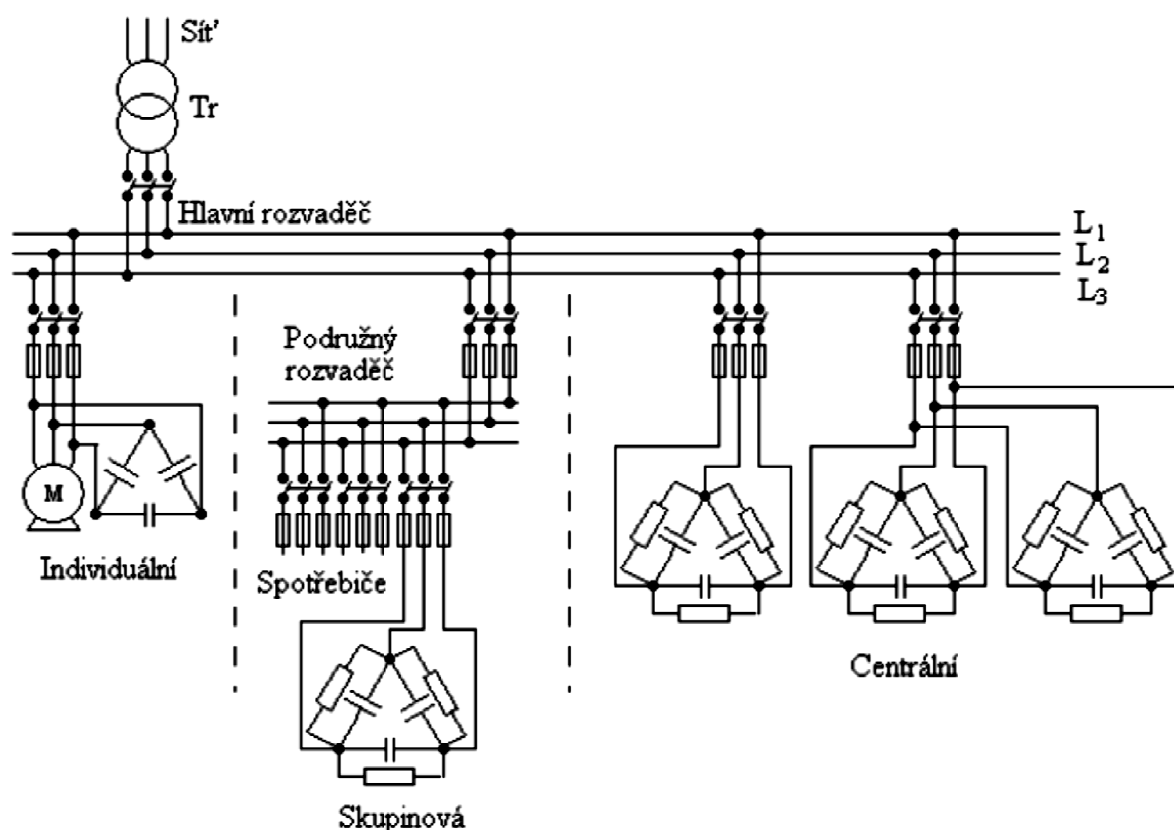
Jedná se o kompenzaci celého průmyslového závodu, principiálně je shodná se skupinovou kompenzací, liší se pouze větším počtem kompenzovaných spotřebičů. Kondenzátorové baterie jsou připojeny na přípojnice vstupní rozvodny nebo do hlavního rozvaděče.



Obr. 4.7 Principiální zapojení centrální kompenzace

Využití kondenzátorů je zde nejlepší, dodávaný kompenzační výkon je nutné opět automaticky regulovat regulátorem jalového výkonu, který připojuje nebo odpojuje jednotlivé stupně v závislosti na velikosti zatížení, resp. odebíraném jalovém výkonu. Nevýhoda tohoto řešení je, že rozvod uvnitř závodu je nevykompenzován, takže na vedení uvnitř závodu vznikají ztráty. Výhoda je, že systém kompenzace je na jednom místě, což představuje snadnější revize a údržbu zařízení než u individuální kompenzace kde jsou kondenzátorové baterie rozmístěné po celém závodu.

V praxi se obvykle setkáme s tzv. smíšenou kompenzací, což je kombinace předešlých typů kompenzace. U spotřebičů s velkými výkony a málo proměnným zatížením můžeme použít kondenzátory pro individuální kompenzaci, u skupin spotřebičů s podobným charakterem provozu pak skupinovou kompenzaci. Na požadovanou resp. předepsanou hodnotu účinníku lze dokompenzovat pomocí centrální kompenzace. Jak je uvedeno v [3] tak při návrhu smíšené kompenzace je vhodné začít od individuální kompenzace. Snažíme se tedy nejprve vykompenzovat např. dlouhodobě běžící velké ventilátory, pak posuzujeme, zda je účelná skupinová kompenzace a nakonec se provede návrh centrální kompenzace, je – li nutné ještě dokompenzovat na potřebnou hodnotu účinníku.



Obr. 4.8 Principiální zapojení smíšené kompenzace [8]

5 Kompenzační zařízení

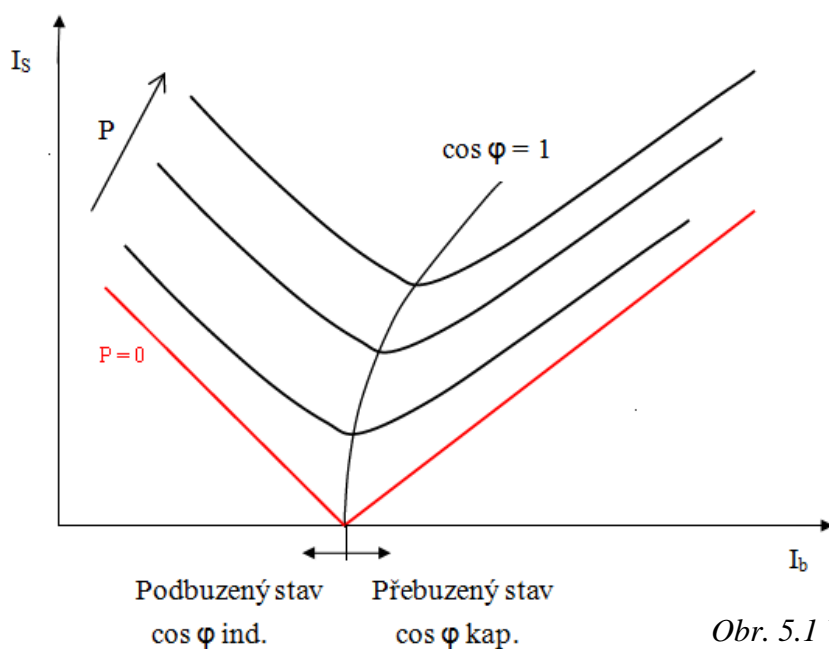
Dle způsobu provozu lze kompenzační zařízení rozdělit na rotační a statická. Rotačním kompenzačním zařízením je synchronní stroj v přebuzeném stavu, dnes se však tento způsob kompenzace již prakticky nepoužívá, ale pro úplnost je zde uveden. Statická kompenzační zařízení představují skupinu prostředků od klasických kondenzátorů až po aktivní filtry. Kompenzování pomocí statických zařízení je dnes v praxi využíváno, a proto mu bude věnována větší pozornost.

5.1 Rotační kompenzátor

Jedná se o synchronní stroj provozovaný v motorickém režimu avšak bez mechanické zátěže na hřídeli, která z principu nemusí být ani vyvedena. Z důvodu možnosti roztočení pomocným asynchronním motorem přes výsuvnou spojku však bývá hřídel vyvedena. Magnetizační energie se synchronnímu motoru (na rozdíl od asynchronního) dodává stejnosměrným budícím vinutím umístěným na rotoru stroje. Změnou budícího proudu lze v určitých mezích měnit jalový výkon, který je strojem buď dodáván, nebo odebírán. Vztah pro velikost jalového výkonu pro stroj s hladkým rotorem, uvažujeme – li $\theta = 0$ a $\varphi = 90^\circ$.

$$Q = 3 \left(\frac{U_{ib} \cdot U_s}{X_d} - \frac{U_s^2}{X_d} \right) \quad (5.1)$$

Využíváme přebuzeného stavu, kdy stroj dodává do sítě induktivní jalový výkon. Důležité jsou tzv. V – křivky synchronního stroje, které ukazují závislost statorového proudu na budícím proudu, přičemž parametrem je činný výkon.



Obr. 5.1 V – křivky synchronního stroje [8]

Protože synchronní motor je v chodu naprázdno, tak činný výkon, který je odebírán ze sítě, hradí pouze mechanické ztráty v ložiskách, ventilační ztráty a ztráty v železe. Je zřejmé, že statorový proud je také konstantní, a proto pro změnu účinníku musíme měnit právě budící proud.

Synchronní kompenzátory se dříve používaly v sítích vn a vvn, kde mimo kompenzace také přispívaly k udržení stability sítě. Zapojeny byly přes terciální vinutí trojvinutového transformátoru 400/110/15 kV. V průmyslových podnicích měly synchronní kompenzátory díky velkým výkonům (cca 1 až 15 MVA) funkci centrální kompenzace a byly připojeny přes samostatný transformátor na přípojnice hlavní rozvodny. Vzhledem k tomu, že synchronní kompenzátor vykazuje jistou časovou prodlevu na dodávku jalového výkonu dle okamžité potřeby, není vhodný pro kompenzaci závodů s rychle se měnícím jalovým výkonem. Může pak dojít ke krátkodobému překompenzování nebo nedokompenzování, což se nepříznivě projeví na velikosti kolísání napětí [6]. Další důvod proč se tato kompenzační zařízení již nepoužívají, je, že se jedná o točivý stroj, což představuje zdroj hluku a vibrací.

5.2 Statické kompenzátory

Jsou to zařízení využívající kondenzátory, tlumivky a další jistící a spínací komponenty. Obecně lze říci, že statické kompenzátory jsou vhodnější než rotační a to především z těchto důvodů: nároky na údržbu a revize jsou nižší, protože zařízení neobsahuje rotační části, z toho plyne i větší spolehlivost. Komponenty statického kompenzačního zařízení jsou umístěny v kompenzačním rozvaděči. Ve spojení s moderními rychlými regulátory jalového výkonu statické kompenzátory mnohem lépe pokryjí dynamicky se měnící potřebu jalového výkonu. V současné době jsou statické kompenzátory hlavní technické prostředky pro kompenzaci jalového výkonu.

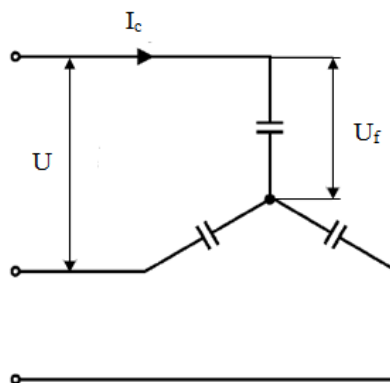
5.2.1 Nechráněné kondenzátory

Instalování nechráněných kondenzátorů je dnes stále ještě nejpoužívanější řešení pro kompenzaci jalového výkonu na hladině nn i vn a to od individuální až po centrální kompenzaci. Jejich použití je vhodné v sítích s nízkým výskytem vyšších harmonických, protože vyšší harmonické mohou protékat přes kondenzátor, který pro ně představuje malou impedanci, to lze snadno dokázat ze vztahu pro kapacitní reaktanci kondenzátoru:

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5.2)$$

Protože vyšší harmonické mají frekvenci danou celočíselným násobkem frekvence základní harmonické, je zřejmé, že kapacitní reaktance bude nižší než pro základní harmonickou 50 Hz. Tím pádem dochází pak k proudovému přetěžování kondenzátoru, což znamená jeho tepelné namáhání a takto provozovaný kondenzátor může být zdrojem poruch. V sítích, kde je velký obsah vyšších harmonických tedy nelze tento způsob použít. Přibližně lze říci, že v sítích kde instalovaný výkon nelineárních spotřebičů nepřesahuje 20% celkového instalovaného výkonu je použití prostých kondenzátorů ještě možné.

Kompenzační kondenzátory lze zapojit buď do hvězdy, nebo do trojúhelníka. Na vysoké napětí se použijí kondenzátory zapojené do hvězdy, na jednotlivých svitcích je pak fázové napětí, což je výhodné z hlediska napěťového dimenzování kondenzátoru a následné ceny. Potřebné vztahy lze odvodit z obrázku:



Obr. 5.2 Zapojení kondenzátorů do hvězdy [9]

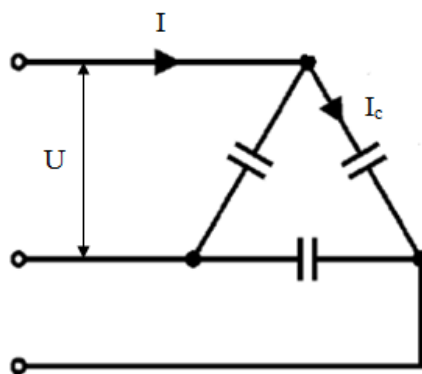
$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (5.3)$$

$$I_c = \frac{U_f}{X_c} = U_f \omega C \quad (5.4)$$

$$Q_{komp} = 3X_c I_c^2 = \frac{3}{\omega C} \cdot U_f^2 \omega^2 C^2 = 3U_f^2 \omega C = 3 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \omega C = U^2 \omega C \quad (5.5)$$

$$C = \frac{Q_{komp}}{\omega U^2} \quad (5.6)$$

Na nízkém napětí se používá zapojení do trojúhelníku, potřebné vztahy lze odvodit podobně jako v předchozím případě.



Obr. 5.3 Zapojení kondenzátorů do trojúhelníku [9]

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (5.7)$$

$$I_c = \frac{U}{X_c} = U\omega C \quad (5.8)$$

$$Q_{komp} = 3X_c I_c^2 = \frac{3}{\omega C} \cdot U^2 \omega^2 C^2 = 3U^2 \omega C \quad (5.9)$$

$$C = \frac{Q_{komp}}{3\omega U^2} \quad (5.10)$$

Porovnáme – li vztahy pro kapacity u obou zapojení, tak vidíme, že v zapojení do trojúhelníku je potřebná kapacita při stejném napětí, kmitočtu a kompenzačním výkonu jako u zapojení do hvězdy třetinová. To znamená menší rozměry kondenzátorové baterie, proto se tomuto zapojení na hladině nn dává přednost.

5.2.2 Chráněná⁷ kompenzace

Kondenzátoru je předřazena do každé fáze ochranná sériová tlumivka. Takto je tvořen každý kompenzační stupeň. Tlumivka omezí nejen proudy vyšších harmonických, které by kondenzátorem procházely ale i proudy vzniklé při přechodových jevech, např. při spínání. Tím chrání kondenzátory před proudovým přetěžováním.

Obvod tlumivky a kondenzátoru je naladěn na rezonanční kmitočet, při kterém se v síti nevyskytují vyšší harmonické ani signál hromadného dálkového ovládání. Tlumivka také zabrání sériové rezonanci mezi kompenzačním kondenzátorem a reaktancí sítě.

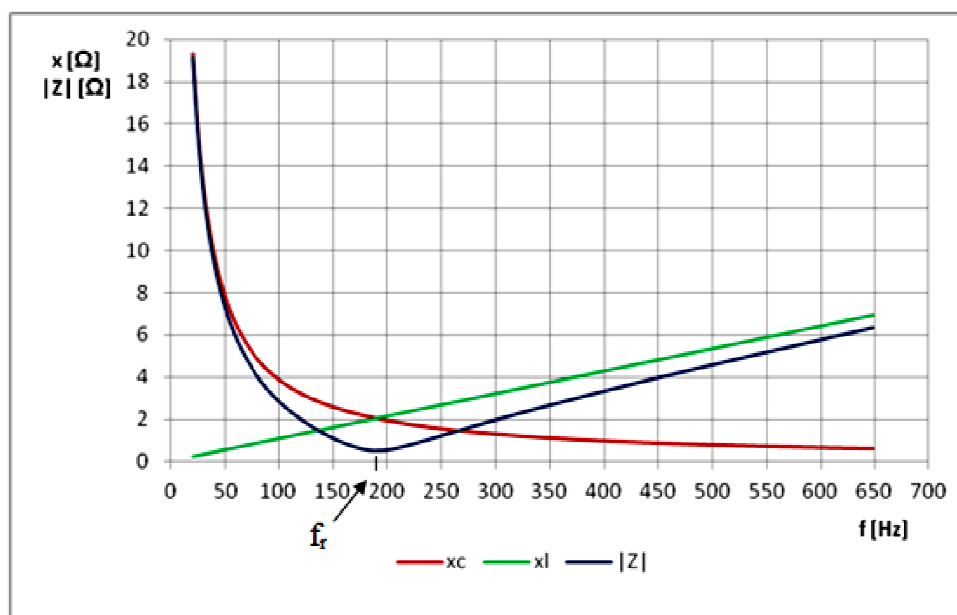
⁷ V praxi se též používá pojem hrazená kompenzace.

Spojením tlumivky a kondenzátoru tedy vznikne sériový rezonanční obvod, jehož rezonanční kmitočet je:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.11)$$

Pro lepší představu chování kompenzačního článku, tj. sériového rezonančního obvodu je vhodné zobrazit průběh velikosti impedance v závislosti na frekvenci podle vztahu:

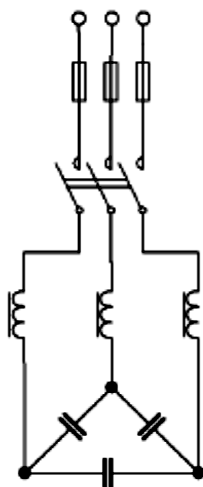
$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5.12)$$



Obr. 5.4 Velikost impedance sériového rez. obvodu v závislosti na frekvenci

Tím dostaneme rezonanční křivku obvodu. Pro vykreslení výše uvedeného grafu byl uvažován kondenzátor 411 μF a tlumivka 1,27 mH, rezonanční frekvence je v tomto případě 189 Hz. Pro kmitočty nižší než je rezonanční kmitočet, tj. i pro 50 Hz, se obvod chová jako kapacita, tj. impedance obvodu má kapacitní charakter protože velikostí převládá kapacitní reaktance. Pro vyšší kmitočty než rezonanční má naopak impedance induktivní charakter a obvod se chová jako indukčnost. Při rezonančním kmitočtu, tj. při kmitočtu kdy se velikosti kapacitní a induktivní reaktance rovnají, je impedance obvodu nejmenší. Je tvořena pouze reálnou složkou, tj. činným ztrátovým odporem obvodu, který je dán především ztrátovým

odporem tlumivky. Vyšší harmonické ze sítě nevymizí, ale kondenzátor je před nimi chráněn, proto také název chráněná kompenzace.



Obr. 5.5 Zapojení chráněného kompenzačního stupně [7]

V praxi se u chráněné kompenzace používá pojem činitele ztlumení, nebo též zacívkování, je definován jako:

$$p = \frac{1}{n_r^2} = \frac{1}{\left(\frac{f_r}{f_n}\right)^2} = \left(\frac{50}{f_r}\right)^2 \quad (5.13)$$

Kde:

f_r - rezonanční frekvence

f_n - jmenovitá frekvence sítě (50 Hz)

Nejčastěji se u chráněné kompenzace používá činitele ztlumení $p = 7\%$. Z předchozího vztahu lze vypočítat, že rezonanční frekvence je 189 Hz. Tyto kompenzační sekce lze tedy použít v síti, která má vysoký obsah 5. harmonické (250 Hz). Naopak v síti kde se vyskytuje ve velké míře 3. Harmonická (150 Hz), je třeba použít kompenzační sekce s činitelem ztlumení $p = 14\%$, které mají rezonanční frekvenci 134 Hz. Tento způsob kompenzace je tedy vhodný tam, kde ještě není třeba filtrovat vyšší harmonické, ale pouze chránit kompenzační kondenzátory před jejich účinky.

Nevýhoda je, že vlivem připojené tlumivky se zvýší napětí na kondenzátoru, což je nutné brát při návrhu v úvahu a použít kondenzátory na vyšší napěťovou hladinu než u

nechráněné kompenzace. Na hladině nízkého napětí se nejčastěji standardně vyrábí kondenzátory pro činitel zatlumení $p = 7\%$, které mají jmenovité napětí 440 V. Výpočtem můžeme stanovit, na kolik se zvýší napětí na kondenzátoru:

$$U_c = \frac{U_{sítě}}{1 - p} \quad (5.14)$$

Po dosazení za napětí sítě $U_{sítě} = 400$ V a činitele zatlumení $p = 0,07$ vyjde, že napětí na kondenzátoru bude přibližně 430 V, proto je vyráběna standardní řada kondenzátorů na napětí 440 V. Při jiném činiteli zatlumení se musí pochopitelně použít kondenzátory na jiné, dostatečně vysoké napětí.

Navrhujeme – li chráněnou kompenzaci, tak stejně jako u nechráněné kompenzace, je výchozí údaj pro návrh potřebný kompenzační výkon a napěťová hladina, na které bude kompenzační zařízení instalováno. Podle potřebného kompenzačního výkonu nejprve vybereme vhodné kondenzátory, u těch stanovíme reaktanci dle vztahu:

$$X_c = \frac{U_{cN}^2}{Q_c} \quad (5.15)$$

Kde:

U_{cN} – jmenovité napětí kondenzátoru

Q_c – jmenovitý výkon kondenzátoru

Reaktanci kondenzátoru lze stanovit ještě jiným způsobem, a to pomocí kapacity kondenzátoru známým vztahem:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (5.16)$$

Dále určíme výslednou reaktanci kompenzačního článku tlumivka – kondenzátor:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_c \quad (5.17)$$

Reaktanci samotné tlumivky pak můžeme vypočítat jako:

$$X_L = p \cdot X_c \quad (5.18)$$

Nebo ji můžeme určit jako rozdíl reaktance samotného kondenzátoru a výsledné reaktance článku tlumivka – kondenzátor:

$$X_L = X_C - X_{LC} \quad (5.19)$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že reaktance kompenzačního článku bude vždy menší než kapacita samotného kondenzátoru právě o hodnotu reaktance tlumivky. Proto je nutné stanovit skutečný kompenzační výkon článku tlumivka – kondenzátor:

$$Q_{LC} = \frac{U_{sítě}^2}{X_{LC}} \quad (5.20)$$

Tedy např. pro kondenzátor s instalovaným výkonem 10 kVAr bude skutečný kompenzační výkon jen 8,9 kVAr. Tento pokles kompenzačního výkonu nastal díky předřazené tlumivce, a také díky tomu, že kondenzátor je připojen na nižší, než jmenovité napětí. Při volbě kondenzátorů se proto řídíme nikoliv podle jejich jmenovitého výkonu, ale podle jejich skutečného kompenzačního výkonu, který je pro příslušnou hladinu napětí udán buď v katalogu, nebo ho zjistíme výpočtem dle rov. (5.20).

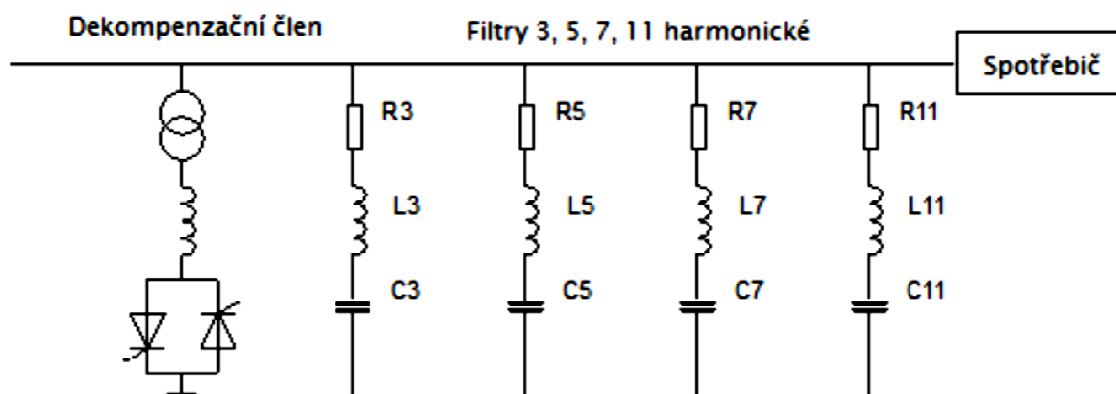
Měrné ztráty jsou oproti nechráněné kompenzaci vyšší, mohou dle [3] dosáhnout až 7W /kVAr a to v důsledku ztrát na tlumivce, protože činné ztráty samotných kondenzátorů jsou dnes již velmi malé, do 0,5 W/kVAr [3]. Je – li kompenzační výkon instalovaný v rozvaděči velký, pak je vhodné použít nucenou ventilaci pro lepší chlazení.

5.2.3 Kompenzační filtry

Tyto filtry se použijí v sítích, kde je vysoký obsah vyšších harmonických a je třeba jejich filtrace. Může se jednat např. o proozy, kde se vyskytují obloukové pece nebo pohony s polovodičovými měniči. Kompenzační filtr je opět tvořen sériovým rezonančním obvodem jako v případě chráněné kompenzace. Zásadní rozdíl je, že kompenzační filtr má rezonanční kmitočet stejný s některou vyšší harmonickou v síti. Jak bylo ukázáno, tak při rezonanční frekvenci je impedance obvodu minimální a obvodem teče největší proud, resp. příslušná harmonická. Takže kompenzační filtr snižuje úroveň vyšší harmonické, na kterou je naladěn tím, že má pro ni minimální impedanci (ideálně nulovou) a tudíž ji ze sítě odsává, čímž brání jejímu dalšímu šíření do sítě. V tom je tedy hlavní rozdíl oproti chráněné kompenzaci, kde se tlumivkou pouze chránil kondenzátor před průchodem vyšších harmonických. Kompenzační účinek zde ale nadále zůstává pro frekvence nižší než rezonanční, proto označení kompenzační filtr. Vhodným návrhem filtru tedy lze potlačit nebo zvětšit buď kompenzační, nebo filtrační účinek [4]. V praxi je často instalováno několik filtrů pro různé harmonické.

Jsou – li jednotlivé filtračně – kompenzační sekce spínány stupňovitě, pak je nutné spínat sekce vzestupně, tj. nejprve připnout filtr naladěný na nejnižší frekvenci. Kdyby byl připnut nejprve filtr naladěný na harmonickou nejvyššího řádu, tak pro nižší, dosud nepotlačené harmonické představuje filtr kapacitní reaktanci. Může pak nastat nežádoucí paralelní rezonance kapacitní reaktance filtru s induktivní reaktancí sítě [6]. To může mít za následek deformaci sinusovky napětí, protože může dojít ke zvýraznění některé harmonické složky napětí. Při odepínání jednotlivých sekcí postupujeme opačným způsobem, tj. první se odepne filtr naladěný na nejvyšší harmonickou.

Dokonalejší možnost jak řídit kompenzační výkon kompenzačních filtrů je plynulé řízení. Jednotlivé filtry jsou do sítě trvale připojeny. Kompenzační výkon filtru nelze měnit změnou velikosti kapacity kondenzátoru, to by vedlo na změnu rezonanční frekvence a tím rozladění filtru. Filtry je tedy nutné doplnit paralelní dekompenzační tlumivkou, která je spínaná např. fázově řízeným tyristorovým spínačem. Je zřejmé, že pomocí dekompenzační tlumivky lze celkový kompenzační výkon pouze snížit. Tento způsob je vhodný tam, kde je vyžadována rychlá změna kompenzačního výkonu, např. u elektrických obloukových pecí.



Obr. 5.6 Plynule řízené kompenzační filtry [7]

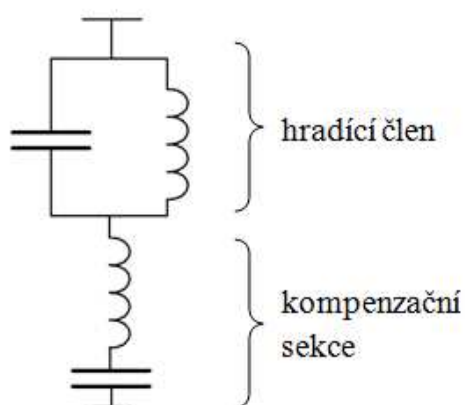
5.3 Ovlivňování signálu HDO

Při návrhu kompenzace je třeba brát v úvahu i problematiku možného ovlivňování signálu hromadného dálkového ovládání (dále jen HDO). Musíme znát kmitočet HDO v konkrétní oblasti kde je navrhována nová kompenzace nebo se plánuje rekonstrukce staré kompenzace.

Kompenzační kondenzátor může vytvořit s induktivní reaktancí sítě sériový rezonanční obvod. Má – li tento obvod rezonanční frekvenci blízko frekvence signálu HDO, pak pro tento signál představuje malou impedanci a signál HDO prochází z velké části

kompenzačním kondenzátorem, to se často označuje jako odsávání signálu HDO ze sítě. Jedná se v podstatě o stejný problém jako při přetěžování kompenzačních kondenzátorů vyššími harmonickými. Opatření proti odsávání je tak opět hradící tlumivka v sérii s kondenzátorem. V případě, že toto opatření není dostatečně účinné, tak se použije tzv. hradící člen. Tento člen je tvořen paralelním spojením kondenzátoru a tlumivky, což představuje paralelní rezonanční obvod. Tento obvod je naladěn přesně na frekvenci signálu HDO (nejčastěji 216% Hz). Jak známo, paralelní rezonanční obvod má při rezonanci největší impedanci, takže signál HDO nemůže pronikat do kompenzačního kondenzátoru a šíří se dále do sítě, takže jeho úroveň není nepřípustně snížena a přijímače HDO signál již bez problému vyhodnotí.

Hradící člen je možné zapojit na každý kompenzační stupeň zvlášť, nebo se jeden hradící člen použije pro všechny kompenzační stupně. V [3] je uvedeno, že v oblastech kde je signál HDO šířen na kmitočtu do 350 Hz se musí chráněná kompenzace (kap. 5.2.2) navrhovat s činitelem zatlumení $p = 7\%$. V oblasti kde je kmitočet HDO vyšší než 350 Hz je nutné chráněnou kompenzaci navrhovat s činitelem zatlumení $p = 8\%$.



Obr. 5.7 Zapojení chráněné kompenzace s hradícím členem

6 Způsoby regulace jalového výkonu

Jalový výkon je nutné regulovat u centrální a skupinové kompenzace, u individuální kompenzace se regulace neprovádí, protože kondenzátorová baterie je navržena dle výkonu spotřebiče. U statických kompenzátorů rozeznáváme podle způsobu změny dodávaného jalového, neboli kompenzačního výkonu kapacitní baterií, tyto druhy regulace:

a) Stupňovitá regulace jalového výkonu

b) Plynulá regulace jalového výkonu

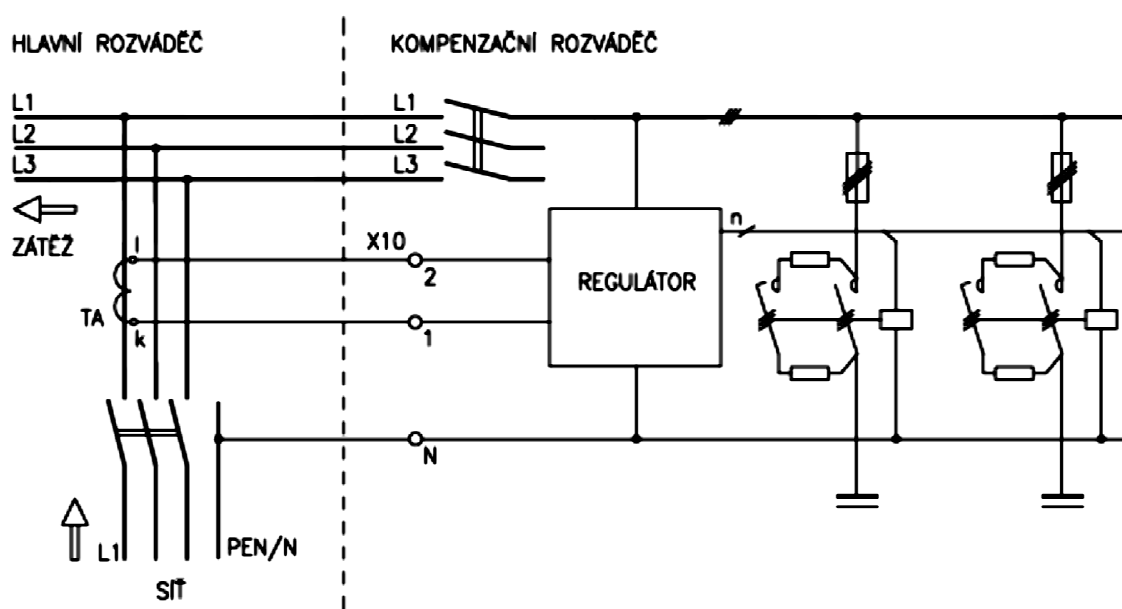
Protože jako první byla používána stupňovitá regulace, je zde také jako první popsána, včetně některých typů regulátorů jalového výkonu a způsobů spínání kondenzátorových baterií. Poté je vysvětlena plynulá regulace jalového výkonu, která byla vyvinuta s rozvojem a zdokonalováním polovodičových prvků.

6.1 Stupňovitá regulace jalového výkonu

U této regulace může být použit dvojí princip spínání kondenzátorových baterií. První způsob je tzv. váhové spínání. Celkový kompenzační výkon kondenzátorů je rozdělen např. na pět stupňů v poměru 1:2:4:8:16. To znamená, že když má první stupeň velikost např. 50 kVAr, tak druhý stupeň má 100 kVAr, třetí 200 kVAr atd. Váhy jednotlivých stupňů však nemusí mít nutně rozdílné velikosti, jsou možné i kombinace, kde jsou např. dva nebo tři stupně stejně velké. Nevýhoda je, že stupně s nejmenším výkonem bývají nejčastěji spínány, aby se doregulovalo na potřebný kompenzační výkon. Tím pádem je – li použito kontaktní spínání, stykače u malých stupňů spínají daleko častěji než stykač kompenzačního stupně s velkým výkonem, který je dlouhou dobu nebo dokonce trvale zapnut. Rovněž kondenzátory v jednotlivých stupních jsou namáhány nestejně v důsledku různé doby, po kterou jsou seplé. Z uvedených důvodů se od váhového spínání se zbytečně velkým počtem kompenzačních stupňů již pomalu upustilo.

U kruhového spínání jsou kompenzační stupně jsou buď podobného, nebo stejného výkonu. Tím pádem je možná jejich záměna a tedy rovnoměrnější zatěžování všech kompenzačních kondenzátorů a stykačů, vždy se postupuje tak, že se vypíná nejdéle zapnutý stupeň a připíná stupeň, který byl nejdéle odepnut. V praxi se ukázalo, že tento způsob vede na snížení průměrného počtu spínacích cyklů a tedy prodloužení životnosti stykačů. Při bezkontaktním spínání počtem sepnutí prakticky nejsme omezeni a rychlost spínání je větší.

Princip stupňovité regulace jalového výkonu je naznačen na následujícím obrázku. Regulátor měří pomocí měřícího transformátoru fázový proud. K měření napětí obvykle slouží napájecí napětí regulátoru. Z naměřených údajů napětí a proudu vnitřní obvody regulátoru určí velikost kompenzačního výkonu tak, aby účinník byl v mezích, které lze na regulátoru nastavit. Podle toho jsou potom ovládány výstupy regulátoru, které jsou obvykle reléové, nebo u některých regulátorů tyristorové. Výstupy jsou připojeny na cívky stykačů, takže pokud některý z výstupů regulátoru sepne, tak je na cívky stykače přivedeno napětí a stykač také sepne, tím je připojen příslušný kompenzační stupeň. Starší regulátory mívaly pět výstupů, v současné době mají regulátory standardně 6 nebo 12 výstupů. Ne na všechny výstupy přitom musí být zapojeny kompenzační kondenzátory, je – li to třeba, tak některé výstupy mohou zůstat volné.

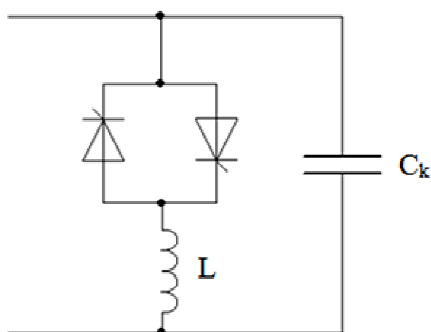


Obr. 6.1 Princip stupňovité regulace jalového výkonu [28]

6.2 Plynulá regulace jalového výkonu

Tento způsob je dalším vývojovým stupněm po stupňovité řízené kompenzaci s bezkontaktními spínači. Někdy bývá také nazýván jako dynamická kompenzace účinníku. Podstata je fázové řízení proudu tlumivkou, která je paralelně připojena ke kompenzační kapacitě. Principiální zapojení je na obr. 6.2. Toto uspořádání bývá také označováno jako filtračně kompenzační zařízení. Umožňuje totiž nejen kompenzaci účinníku ale i filtraci vyšších harmonických, nejčastěji 5. 7. a 11. řádu.

Řízení proudu tlumivky je zajištěno dvěma antiparalelně zapojenými výkonovými tyristory. Velikost proudu tlumivky je řízena úhlem sepnutí tyristorů α . Zvětšování proudu tlumivkou má za následek snižování výsledného kompenzačního proudu a tím pádem i snižování dodávaného jalového výkonu. Z principu činnosti plyne, že velikost dodávaného jalového výkonu lze pouze snižovat. Kompenzační výkon proto musí být navržen tak, aby pokryl maximální jalový výkon, který bude odebírán. Výhoda plynulé regulace je, že algoritmus řízení tyristorů lze měnit a může být pro každou fázi jiný, takže lze vyrovnávat nerovnoměrné odběry jalového výkonu v jednotlivých fázích. Další výhodou použití dynamické kompenzace je, že se sníží úroveň flickru, tj. kolísání světelného toku svítidel. Flickr je způsoben rychlými změnami napětí a ty jsou způsobeny zařízeními, která rychle mění svůj odběr, jedná se např. o obloukové svářečky, katry, velké motory které jsou opakovaně periodicky rozbíhány atd.



Obr. 6.2 Princip plynulého řízení jalového výkonu [3]

Dynamickou kompenzací se sníží výkyvy odběru jalového výkonu a tím i změny napětí, takže flickr je potlačen a je zvýšena kvalita napětí u odběratele. Je nutné si uvědomit, že kdybychom instalovali pro kompenzaci výše uvedených spotřebičů klasickou, stupňovitě řízenou kompenzaci, tak se situace podstatně zhorší. Rychlost spínání kondenzátorů by nestačila sledovat změny jalového výkonu zátěže, takže by docházelo k překompenzování nebo naopak nedokompenzování. To by ve výsledku rozkolísalo napětí sítě ještě více, než kdyby kompenzace nebyla použita vůbec. Nevýhodou dynamické kompenzace je, že tyristorový spínač vytváří vyšší harmonické, protože při sinusovém průběhu napětí vytváří nesinusový průběh proudu. S tímto je v návrhu dynamické kompenzace také nutné počítat např. zařazením filtrů vyšších harmonických.

7 Regulátory jalového výkonu

Aby bylo možné regulovat kompenzační výkon kondenzátorů podle potřeby, je nutné kompenzační zařízení vybavit regulátorem jalového výkonu. Ten slouží ke stupňovitému řízení kompenzačního výkonu tím, že podle potřeby ovládá odepínání nebo připínání kondenzátorových baterií. Regulátor je důležitá součást systému kompenzace, neboť rozhoduje o rychlosti změny požadovaného kompenzačního výkonu. Tyto změny jsou často velmi rychlé, proto se regulátory postupně zdokonalovaly a dnes se používají rychlé číslicové regulátory, které jsou kromě řízení jalového výkonu vybaveny ještě řadou dalších funkcí. Číslicovým regulátorům bude věnována největší pozornost, protože postupně nahrazují starší typy analogových regulátorů.

7.1 Regulátor WOR

Je to starý typ impulzního elektromechanického regulátoru. Existovaly 3 typy tohoto regulátoru lišící se především počtem regulačních stupňů, který je dán číslem v označení: WOR – 2, WOR – 4, WOR – 8. Poslední dva typy bylo ještě možné spojit se zařízením WOR – p, které sloužilo k zvětšení počtu regulačních stupňů o 4 stupně. Velikost regulačních stupňů kondenzátorové baterie musela být stejná, což představovalo omezení. Regulátor také pracoval s jistým zpožděním, takže nereagoval na krátkodobé nárazy potřeby jalového výkonu.

Regulátor se skládá ze tří hlavních částí: měřící článek, časový článek a pomocná relé RP 90A. Celý systém je namontován ve skříni s průhledným čelním okénkem. Funkci regulátoru lze stručně popsat takto: regulační rozmezí, tj. min. a max. hodnota jalového výkonu, se udržuje pomocí polohy ramének. Rozmezí lze nastavit posunutím ukazatelů na stupnici. Měřicí systém má otočnou část, která je ve střední poloze držena direktivním momentem dvou pružin. Pokud je zatížení sítě indukční, tak se systém vychyluje doprava, při kapacitním zatížení doleva. Když měřený jalový výkon překročí nastavené rozmezí, dojde k uzavření kontaktů na levé nebo pravé straně. Časový článek dostane napětí a jeho kotouč se začne otáčet. Prostřednictvím pohyblivého kotouče je ovládáno kontaktní zařízení pro spínání a rozpínání pomocných relé. Při otáčení kotouče doprava dostávají pomocná relé zapínací impulzy. Jednotlivá relé postupně zapínají a připínají kondenzátory k síti. Po vykompenzování se kotouč zastaví a nastavený počet stupňů zůstane zapojen. Podobný postup je při odpínání jednotlivých stupňů, kdy dochází ke zkratování jednotlivých relé, a tím k odpojování kondenzátorů. Odepínání kondenzátorů probíhá v obráceném pořadí než jejich zapínání. V dnešní době se tento typ v praxi již nepoužívá.

7.2 Regulátor RQ 5U

Jedná se o automatický analogový regulátor, který může spínat 5 kompenzačních stupňů. Váhy spínání mohou být od 1:1:1:1:1 až po 1:2:4:8:16. Tento regulátor již neobsahuje pohyblivé části, což je výhoda. Při situaci, kdy není síť vykompenzovaná, spíná postupně jednotlivé stupně, resp. sady kondenzátorových baterií, v pořadí od nejmenší k největší. V případě, že dojde k překompenzování, začne ve stejném pořadí jednotlivé stupně odepínat. Zapnutí jednotlivých stupňů je signalizováno na čelním panelu pomocí pěti LED diod. Činnost regulátoru je signalizována taktéž pomocí tří LED diod na čelním panelu.

Velikost jalového výkonu je vyhodnocována z okamžitých průběhů proudu a napětí. V okamžiku, kdy napětí prochází nulou, je změřena velikost okamžité hodnoty proudu. Při sinusových průbězích hodnota změřeného proudu odpovídá jalovému proudu a tedy i jalovému výkonu. Z principu měření je zřejmé, že při zdeformovaných průbězích proudu a napětí regulátor nepracuje správně, protože měření je nepřesné. Tento typ regulátoru byl dříve často využíván, dnes se však nahrazuje mikroprocesorovými regulátory.

7.3 Regulátory NOVAR

Tato kapitola je zpracována na základě pramenu [15]. Regulátory NOVAR provádí digitální zpracování naměřených hodnot. Starší typ 5 RQ je určen jako náhrada analogového regulátoru RQ 5. Náhradu lze provést pouhou záměnou, neboť oba typy jsou z mechanického hlediska i způsobu připojení kompatibilní. Tento typ je určen pro méně náročné aplikace. Tím, že je signál digitálně zpracován, se dosáhne velké přesnosti vyhodnocení proudu a následně účinku. Je zde použit algoritmus FFT pro zajištění správné funkce v případě zkreslení vyššími harmonickými. Velikost kompenzačních stupňů je možné zadat buď ručně, nebo si ji regulátor automaticky zjistí, včetně způsobu připojení. Přepínání a odpínání kondenzátorů je řešeno tak, aby požadovaný kompenzační výkon byl dosažen minimálním počtem připínaných stupňů. Jednotlivé stupně se volí s ohledem na rovnoměrnost jejich zatížení. Přednostně se proto připínají stupně odepnuté nejdéle. Zbytkový náboj těchto stupňů je minimální, a tak je omezen vznik proudových nárazů při spínání.

V současné době je na trhu k dispozici i rychlý regulátor NOVAR 1312. Je určen obecně pro případy, v kterých nevyhovují klasické regulátory s reléovými výstupy pro připojení stykačů. Tento případ nastane např. v průmyslovém podniku, kde dochází k rychlým a častým změnám jalového výkonu. Výrobce udává, že regulátor je schopen provést až 20 regulačních zásahů za sekundu. Přístroj je vybavený přesným napěťovým a proudovým měřicím obvodem a digitálním zpracováním naměřených hodnot je dosaženo vysoké

přesnosti vyhodnocení hodnot napětí, proudu i účinníku. Výpočet harmonických složek se provádí stejně jako u starších typů algoritmem FFT. Tím je zajištěna přesná funkce měření a regulace i v sítích kde dochází k harmonickému zkreslení.



Obr. 7.1 Regulátor NOVAR 1312 [15]

Protože tento typ regulátoru umožňuje připojení klasických stykačů i tyristorových spínacích modulů, je zde použit pomalý a rychlý regulační proces, oba procesy jsou do jisté míry nezávislé. Pomalým procesem jsou ovládány stykače, je nutné přitom respektovat omezení daná mechanickými vlastnostmi stykačů. Měření probíhá jednou za sekundu, dle zjištěné regulační odchylky a doby regulace proběhne časování regulační fáze. Nejvhodnější regulační zásah je volen nejen podle velikosti stupňů, ale i dle dalších hledisek jako jsou: počet sepnutí daného stupně, doba od posledního odepnutí a celkový počet přepnutí v regulačním zásahu. Tyristorové spínače jsou ovládány rychlým regulačním procesem a mohou spínat až 20 x za sekundu. Rychlý proces je rozdělen do fáze měření, výpočtu a regulačního zásahu. Pro určení optimálního regulačního zásahu je rozhodující pouze hodnota každého regulačního stupně, přičemž stupně stejné velikosti jsou spínány kruhově. Je možné nastavit dobu po kterou nelze zapnout právě odepnutý stupeň, a to od 0,1 do 10 sekund. Tím je zabráněno vzniku nežádoucích proudových rázů při připínání ne zcela vybitých kompenzačních stupňů.

V praxi probíhá typický regulační proces tak, že rychlý proces vykompenzuje během zlomků sekundy odchylku účinníku, které odpovídají okamžité regulační kapacitě tyristorových stupňů. V případě vzniku větší odchylky účinníku vyhodnotí pomalý proces vzniklou regulační odchylku a začne se odpočítávat regulační doba tohoto pomalého regulačního procesu. Po jejím uplynutí se provede regulační zásah pomocí stykačových stupňů.

Existuje řada dalších typů regulátorů řady NOVAR. Jejich popis zde však již není

uveden, neboť technické specifikace, návod k montáži a obsluze a řadu dalších detailních informací lze nalézt na stránkách výrobce v příslušných manuálech, např. v [15].

7.4 Regulátor EFR 7

Text této kapitoly je zpracován na základě [27]. Tento regulátor je určen stejně jako NOVAR 1312 pro aplikace, kde se rychle mění odebíraný jalový výkon, jako např. svařovací automaty nebo pohony s rychle se měnícím zátěžným momentem. Pro tyto aplikace již klasické spínání pomocí stykačů nevyhoví a je třeba použít spínání pomocí tyristorových spínacích jednotek ve spojení s rychlým regulátorem.



Obr. 7.2 Rychlý regulátor EFR 7 [27]

Regulátor EFR 7 je určen pro velmi rychlou kompenzaci ve třífázových systémech, Hodnotu $\cos \varphi$ je možno nastavit v rozsahu 0,85 induktivní až 0,85 kapacitní s krokem 0,01. Jeho uváděná doba odezvy je kratší než 80 mS. Regulátor je řešen jako třífázový, s možností nezávislé regulace v každé fázi, proto se používá v sítích, kde jalový výkon v jednotlivých fázích není stejný a je nutné připojovat různě velké kondenzátory.

Výpočet účinníku se provádí na základě výsledků měření proudů ve všech fázích a změřeného fázového napětí. Z těchto hodnot se vypočítává potřebný kompenzační výkon pro všechny fáze a na základě toho pak regulátor určí velikost připojovaných kompenzačních impedancí, resp. kondenzátorů na jednotlivá sdružená napětí. V případě nevyvážené zátěže je provedena optimalizace velikosti kompenzačních impedancí tak, aby nedošlo k překompenzování v žádné fázi. Na displeji přístroje je možné zobrazit celkový účinník, proudy jednotlivých fází, stavy výstupů a další parametry.

Regulátor může být provozován buď v ručním (test), nebo v automatickém režimu (regulátor). V ručním režimu lze libovolně manipulovat s jednotlivými výstupy nebo je

možno všechny výstupy vypnout. Tak je možno snadno testovat funkci výstupů i připojených spínacích prvků. Dále je možno v ručním režimu sledovat na displeji stav všech výstupů a ověřovat funkci spínačů a kondenzátorů. Zvolenou kombinací nastavení výstupů je možno uložit do zálohované paměti a v případě potřeby ji později znovu vyvolat.

Princip činnosti regulátoru v automatickém režimu lze popsat takto: nejprve jsou během jedné periody navzorkovány a uloženy do paměti průběhy napětí a proudů ve všech fázích. Tyto hodnoty jsou získány prostřednictvím přístrojových transformátorů. Po skončení měření je provedena matematická analýza, z naměřených průběhů je zpětně rekonstruována základní harmonická proudů a je vyhodnocen její fázový posuv vůči napětí. Je vypočten také potřebný kompenzační výkon. Poté je určen stav jednotlivých výstupů tak, aby jalový výkon byl vykompenzován. Při spínání jednotlivých výstupů se také bere v úvahu pravidelné střídání jednotlivých spínačů. Po nastavení výstupů je před dalším měřením zařazena prodleva potřebná k odeznění přechodových dějů, které nastaly vlivem regulačního zásahu. Prodlevu je možno nastavit v rozsahu od 20 ms do 5 s, dle charakteru a doby trvání přechodných dějů.

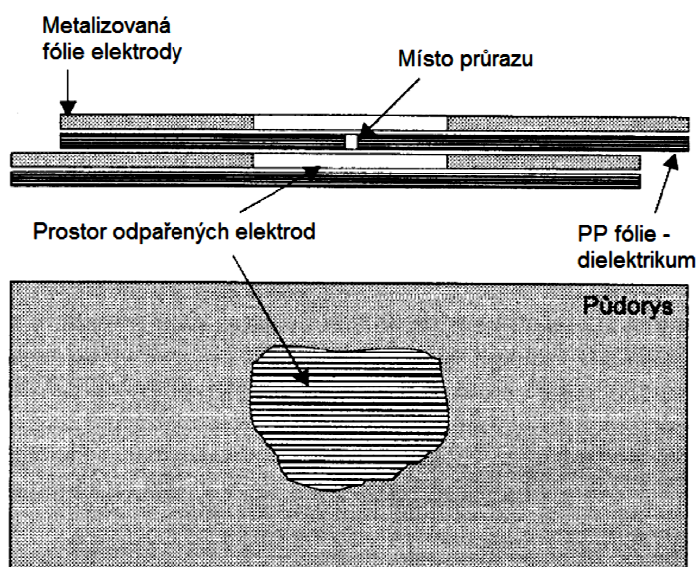
K ovládní tyristorových výkonových spínačů je k dispozici 3 x 7 výstupů (7 výstupů pro každou fázi). Výstupy jsou od silových obvodů galvanicky oddělené a jsou realizovány pomocí tranzistorů. Výstupy pro jednotlivé kompenzační stupně lze nastavit s váhou 1,2 nebo 4. Regulátor je zabudován ve skřínce s rozměrem čelního panelu 144 x 144 mm se stupněm krytí IP 54. K obsluze slouží jednoduchá klávesnice se čtyřmi tlačítky.

8 Kompenzační kondenzátory

Kompenzační kondenzátory jsou základním prvkem kompenzačního zařízení, neboť dodávají potřebný jalový výkon. Vyrábějí se pro hladinu nízkého i vysokého napětí zpravidla ve válcovém nebo krabicovém provedení. Kromě toho, zda je kondenzátor pro hladinu nn nebo vn je také nutné rozlišovat, zda má být použit v chráněné nebo nechráněné kompenzační sekci. Ve chráněné kompenzační sekci je totiž nutné počítat s určitým zvýšením napětí na kondenzátoru vlivem zařazené tlumivky. Výrobci toto respektují a tak jsou v nabídce již kondenzátory pro zvýšené napětí, např. pro 440 V. Kompenzační kondenzátory se vyrábí nejčastěji v této řadě jmenovitých výkonů:

1 – 1,5 – 2,5 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 10 – 12,5 – 16 – 18 – 20 – 25 – 30 – 33,3 – 37,5 – 40 – 45 – 60 – 63 – 67 – 75 – 80 – 100 – 125 – 150 – 200 [kVAr]

V současné době se kondenzátory převážně konstruuje s pokovenou polypropylenovou fólií na elektrody a polypropylenovou fólií na dielektrikum. Tyto systémy se označují jako MKP. Výhoda je, že kondenzátor po průrazu dielektrika není zničený, ale nastane tzv. samoregenerační proces. Průraz může nastat např. napět'ovým přetěžováním vyššími harmonickými nebo tepelným namáháním. V místě průrazu dojde vlivem vysoké teploty k odpaření vodivé vrstvy, to má za následek vznik malé izolační plochy, viz obr. 8.1.



Obr. 8.1 Průraz dielektrika MKP kondenzátoru [3]

Kapacita kondenzátoru při tomto procesu poklesne o několik desítek až stovek pikofaradů [3], což je v porovnání s celkovou kapacitou zanedbatelné, takže je správná funkce kondenzátoru zachována.

8.1 Kondenzátory na nízké napětí

Na hladině nízkého napětí se používají třífázové kondenzátorové jednotky, jednotlivé svitky jsou zapojeny na sdružené napětí, tj. do trojúhelníka. Důvod je ten, že oproti zapojení do hvězdy se dosáhne trojnásobného kompenzačního výkonu, odvození viz kap. 5.2.1, takže kondenzátory pak zabírají méně místa. Místo je také ušetřeno dokonalejší konstrukcí než v minulosti, protože se zmenšila potřebná velikost na jednotku výkonu. Zlepšila se rovněž spolehlivost a možnost ekologické likvidace starých kondenzátorů. Dříve byly kondenzátory impregnovány polychlorovanými byfenily (PCB) s obchodním názvem DELOR 103. Vyráběly se v podniku " Závody elektrotepelných zařízení Praha n. p. závod Žamberk " a to v období od roku 1972 do roku 1985. Tyto kondenzátory představovaly podle pozdějších vyhlášek nebezpečný odpad a do konce roku 2010 měly být zcela nahrazeny kondenzátory s nezávadným impregnantem. Životnost dnešních kondenzátorů se pohybuje okolo 100 000 provozních hodin. Při náročnějších provozních podmínkách jako např. vyšší okolní teplota nebo velká četnost spínání se životnost snižuje. Vysoká teplota urychluje degradaci dielektrika, rovněž rychlé změny teploty způsobují degradaci. V [3] je uvedeno, že tam, kde nelze zajistit dostatečně účinné chlazení, se musí použít kondenzátory se speciální konstrukcí, nebo kondenzátory s vyšším jmenovitým napětím.

8.1.1 Konstrukce

Kondenzátory válcové konstrukce mají pouzdro z taženého hliníku, krabicové provedení je svařeno z ocelového plechu. Trojúhelníková pouzdra z hliníku jsou spíše ojedinělá. Nádoby jsou hermeticky uzavřeny, což je důležité z hlediska ochrany proti navlhání dielektrika, ale i z hlediska požární bezpečnosti.

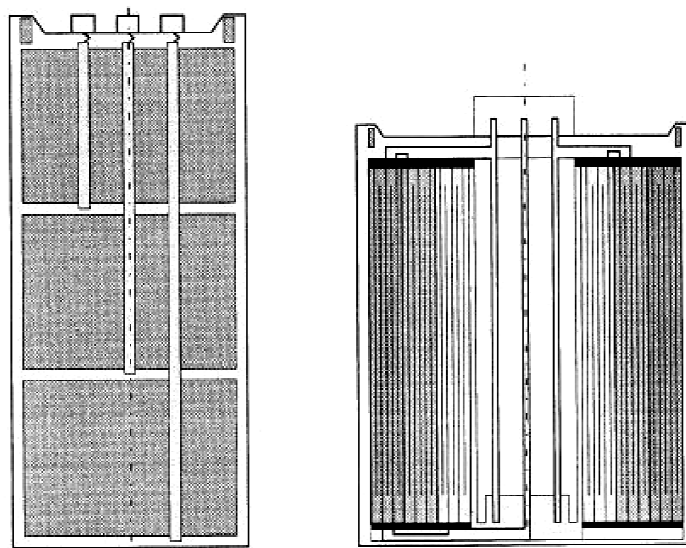


Obr. 8.2 Příklady provedení kondenzátorů na nízké napětí [16]

Impregnace je provedena kapalnou, nebo tuhou látkou, vyskytují se ale i plynné impregnanty. Krytí kondenzátoru resp. svorkovnice závisí na typu použitého krytu případně i na typu vývodek, může být od IP 00 až po IP 54. Vnitřní konstrukce je provedena jako MKP nebo MKV systém, častěji je používán MKP systém. U MKP kondenzátorů je provedení suché, bez olejové náplně, takže nehrozí průsak oleje, jak tomu bývalo u starých olejových kondenzátorů. Svitky jsou zality v pevné rostlinné hmotě, která je ekologicky nezávadná, což je důležité pro pozdější likvidaci kondenzátorů. U systému MKV tvoří elektrody oboustranně pokovený papír, dielektrikum je z polypropylénové fólie. Impregnace je provedena minerálním olejem, tento typ kondenzátorů je proto vhodný pro náročnější podmínky, tj. pro vyšší okolní teplotu nebo vyšší výkonové zatížení. Čela svitků jsou na obou stranách „šopována“ (metalizována), na čela jsou přiletovány vývody, které spojují svitek s vnější svorkovnicí.

Prostorové uspořádání svitků může být buď nad sebou, nebo sousedě jeden na druhém. V uspořádání nad sebou se jedná o tři svitky umístěné ve válcové nádobě nad sebou. Toto uspořádání je výhodnější z hlediska odvodu tepla, které je nutné ze svitků odvést přes hliníkovou nádobu do okolí. Další výhodou je, že kondenzátory se mohou konstruovat s menším průměrem, avšak jsou vyšší. V sousedém uspořádání jsou všechny tři svitky navinuty jeden na druhém, což přináší větší nebezpečí zkratu mezi svitky.

Ztráty se v poslední době podstatně snížily, výrobce kompenzačních kondenzátorů ZEZ – Silko např. udává v katalogu [16] celkové ztráty 0,4 W/kVAr. Nicméně existují i kondenzátory se ztrátami 0,25 W/kVAr.

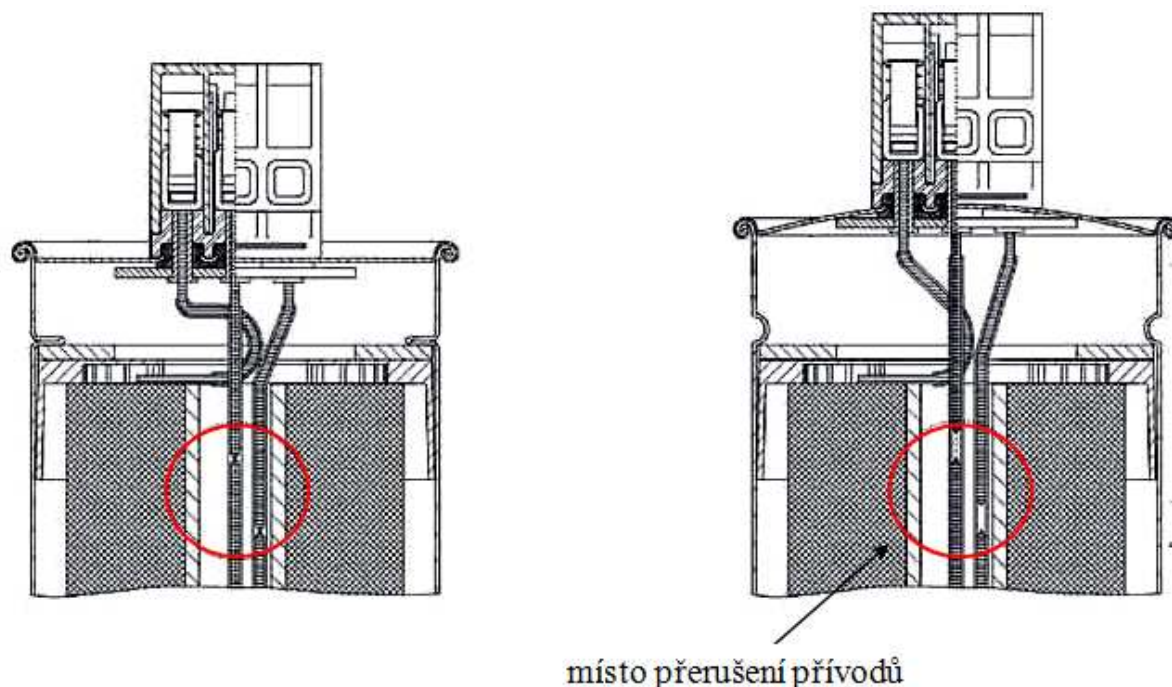


Obr. 8.3 Uspořádání svitků nad sebou a sousedě uspořádání [3]

8.1.2 Přetlaková pojistka

Pro případ že dojde k přetížení kondenzátoru na takovou mez, že by hrozila jeho exploze, je uvnitř nádoby instalována přetlaková pojistka neboli přetlakový odpojovač. Tento odpojovač při zvyšujícím se tlaku v nádobě přeruší přívody ke svítkům. Princip je, že při opakovaných průrazech, zejména na konci životnosti kondenzátoru, se vyvíjí v důsledku odpařování kovu z elektrod plyn a tlak v nádobě proto roste. Při překročení určité hodnoty tlaku dojde k deformaci, resp. vypoulení víka kondenzátoru a tím přetržení přívodů ke svítkům uvnitř nádoby, kondenzátor je tak odpojen od napětí, čímž je zabráněno explozi. Je třeba, aby vnitřní uspořádání umožnilo průchod plynu až do horní části nádoby i při poruše u dna kondenzátoru. Na obr 8.4 je princip působení přetlakové pojistky, v označeném místě jsou přívody zeslabeny a proto se zde také po vypoulení víka přeruší.

U krabicových kondenzátorů není možný aplikovat princip přetlakové pojistky jako u válcových kondenzátorů s hliníkovým pouzdem. Proto je u krabicových kondenzátorů větších výkonů použita tlaková pojistka zabudovaná do víka nádoby. Pojistka obsahuje tlakové čidlo s volným přepínacím kontaktem v ovládacím obvodu. Vypínán je stykač v napájecím přívodu, takže kondenzátor je rovněž odpojen od napětí.



Obr. 8.4 Princip působení přetlakové pojistky [16]

8.1.3 Vybíjecí rezistory

Kondenzátor je akumulační prvek, takže po jeho odpojení od napětí je na něm nějakou dobu elektrický náboj, proto jsou kondenzátory vybaveny vybíjecími rezistory, které jsou trvale zapojené mezi jednotlivé svitky. U jednofázových kondenzátorů se používá jeden rezistor, u třífázových buď dva, nebo tři rezistory. Rezistor je zařazen především z důvodu bezpečnosti, tj. splnění požadavku, že do jedné minuty by se mělo napětí na svorkách kondenzátoru po jeho odpojení snížit pod bezpečnou hodnotu 50V. Vybíjecí rezistory slouží rovněž k vybití kondenzátoru, aby při jeho dalším připojování nevznikl nebezpečný přechodový děj a tím se šetří kontakty stykačů. U válcových kondenzátorů jsou rezistory již z výroby umístěny na víku kondenzátoru, resp. na svorkovnici. U krabicových kondenzátorů bývají rezistory uvnitř nádoby. Vybitím kondenzátoru se sníží potřebná prodleva mezi jeho opětovným zapínáním a to přispívá k lepší dynamice kompenzace. Velikost rezistoru je nutné vhodně zvolit, jsou zde dvě protichůdná hlediska. Čím menší rezistor bude, tím větší ztráty na něm budou při provozu vznikat, ale vybití kondenzátoru bude rychlé. Naopak při velké hodnotě rezistoru jsou ztráty malé, ale není zajištěn dostatečně rychlý pokles napětí pod bezpečnou hodnotu. Je proto nutné zvolit kompromis mezi těmito dvěma hledisky. Měrná velikost ztrát na vybíjecích rezistorech bývá dnes okolo 0,1 W/kVAr.



Obr. 8.5 Způsob připojení fóliových vybíjecích rezistorů [12]

8.1.4 Montáž

Montážní poloha kondenzátorů je v podstatě libovolná, avšak téměř vždy jsou instalovány ve svislé poloze těsně vedle sebe, aby bylo místo v kompenzačním rozvaděči co nejlépe využito. Při montáži těsně vedle sebe je pak nutné počítat i ze zhoršeného odvodu tepla do okolí. Všechny kondenzátory mají mít ochranný svorník M 12 umístěný na dně

nádoby, dotahovací moment je 5 Nm. V případě že svorník neplní funkci ochranné svorky, lze jej použít i pro upevnění kondenzátoru. Kondenzátor je také možno upevnit v rozvaděči pomocí objímky [16].

Svorkovnice pro připojení vodičů je provedena jako třífázová šrouby M5 s dotahovacím momentem max. 2 Nm. Přívodní vodiče se ukončí ve třmenové svorce průchodky. Pro správnou funkci přetlakové pojistky je nutné, aby byla umožněna dilatace resp. vyboulení víka o cca 20 mm, to musí být respektováno při montáži připojovacích vodičů. Kondenzátory je možno paralelně propojovat, ale pouze na svorkách, které jsou k tomu určeny, tj. umožňují průběžně připojení vodičů, vybíjecí rezistory bývají u tohoto uspořádání fóliové, viz obr. 8.5.

Při provozu kondenzátorů se musí sledovat především parametry jako je teplota, proud a napětí. Přetížení může vzniknout vlivem vyšších harmonických v síti, nebo vyšší hodnotou provozního napětí. Je také nutné sledovat, zda hodnota proudu kondenzátorem neklesá pod jmenovitou hodnotu, to by znamenalo pokles kapacity. Pokud by proud klesl o více než 20% pak je nutné kondenzátor vyměnit. Jištění kondenzátoru je doporučeno provést výkonovými pojistkami s pomalou charakteristikou gG, kvůli přechodným jevům při zapínání, se jmenovitým proudem 1,6 až 1,8 násobku proudu kondenzátoru [16].

8.2 Kondenzátory na vysoké napětí

Kondenzátory pro hladinu vysokého napětí jsou řešeny opět jako trojfázové, nebo jako jednofázové jednotky. U trojfázové jednotky jsou pak jednotlivé svitky zapojeny na fázové napětí, tj. do hvězdy. Důvodem jsou nižší nároky na napěťové dimenzování kondenzátorů. Dielektrikum je tvořeno polypropylénovou fólií impregnovanou syntetickou kapalinou. Tato kapalina je zdravotně i ekologicky nezávadná. Elektrody jsou tvořeny hliníkovou fólií. Nádoba je krabicová a je stejně jako u nízkonapěťových kondenzátorů izolovaná, výrobce však může na požádání zákazníka propojit jeden pól s nádobou. Vybíjecí rezistory jsou zabudovány v nádobě, napětí se u těchto kondenzátorů musí po odpojení snížit na 75 V do 10 minut. Ve víku bývá tlakové čidlo na 230 V a porcelánové průchodky. Provedení, velikost nádoby a především rozměry průchodek jsou různé podle napětí. Např. v katalogu ZEZ – Silko [16] nalezneme provedení podle napětí do 7,2 kV, pro napětí větší než 7,2 kV a pro napětí větší než 12 kV. Výkon jednoho kondenzátoru se pohybuje standardně od 25 do 600 kVAr.



Obr. 8.6 Kompenzační kondenzátory na vysoké napětí [16]

9 Způsoby spínání kondenzátorů

Dle principu činnosti rozlišujeme kontaktní a bezkontaktní spínání. Ke kontaktnímu spínání jsou použity buď klasické stykače, nebo nověji stykače s odporovým spínáním. Bezkontaktní spínání je zajištěno polovodičovými prvky, např. tyristory. V současné době se stále ještě více používá kontaktní spínání i přes jeho četné nevýhody, je to díky vysoké ceně polovodičových spínačů a rychlých regulátorů jalového výkonu, které se ve spojení s bezkontaktními spínači používají, zejména na hladině vysokého napětí.

9.1 Spínání klasickými stykači

Protože stykač je elektromechanický přístroj, obsahuje pohybující se mechanické části. Jeho použití je omezeno rychlostí spínání a počtem spínacích cyklů. Používají se tedy tam, kde nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost kompenzace. V klasických kompenzačních rozvaděčích se používají stykače třídy AC 3, se jmenovitým proudem nejčastěji v rozmezí 25 – 100 A. Uváděná proudová přetížitelnost těchto stykačů je cca desetinásobek jmenovitého proudu. U stykačů, které jsou v současnosti k dispozici, bývá četnost spínání za hodinu v řádu stovek sepnutí, elektrická životnost je pak řádově 10^4 spínacích cyklů.

Největší problém kontaktního spínání je vznik přechodových jevů při spínání kondenzátoru. U centrální nebo skupinové kompenzace nastává situace, kdy k již zapnutým kompenzačním stupňům je připínán další kondenzátor. Kondenzátor má zpravidla nulové napětí, tj. je vybit. Připínání tohoto kondenzátoru je provázeno přechodným dějem, který má tlumený průběh s kmitavým charakterem [3]. Amplituda proudu při přechodném ději závisí na velikosti napětí sítě, kapacitě kondenzátoru, impedanci sítě mezi zdrojem a připínaným kondenzátorem a na okamžiku sepnutí kondenzátoru, resp. na zbytkovém napětí na kondenzátoru. Právě okamžik sepnutí zde není definován, protože stykač sepne hned, jak se na jeho cívce objeví ovládací napětí. Definování okamžiku sepnutí je vyřešeno až u bezkontaktního spínání.

Je zřejmé, že přechodový děj má za následek vznik impulzního rušení. Toto rušení má obvykle vysoký kmitočet a šíří se napájecí sítí, na níž je kompenzátor připojen. Tím mohou být ovlivněna další elektronická zařízení, zejména ta, která jsou napojena do rozvaděče napájeného ze stejného transformátoru jako kompenzační rozvaděč. Další problém je proudové přetěžování nejen samotných stykačů, ale i dalších komponentů kompenzačního zařízení. Na kontaktech stykačů pak dochází k opalování vlivem el. oblouku, který vzniká v důsledku odskoku kontaktu, Právě kvalita kontaktů určuje životnost stykače. Na kontaktech namáhaných opalováním vznikají změny v jejich struktuře, což má za následek zvětšení

přechodného odporu mezi kontakty a tím pádem jejich vyšší oteplování. V důsledku toho vznikají časté poruchy a v nejhorším případě může dojít i ke svaření kontaktů. Dříve se pro zvýšení životnosti stykačů jejich kontakty proudově předdimenzovávaly, to však bylo neekonomické a požadovaný efekt nebyl dosažen, zejména při častém spínání.

Z uvedených úvah vyplývá, že pro prodloužení životnosti stykače, se snažíme omezit velikost proudu vzniklého při přechodových dějích. Toho lze obecně dosáhnout zvětšením impedance obvodu mezi připnutým a připínaným kondenzátorem. Impedance se může zvýšit trvale, nebo pouze na určitou dobu než odezní velký počáteční proud přechodného děje. Trvalé zvýšení impedance je realizováno pomocí vzduchových tlumivek s indukčností v rozmezí 10 – 100 μH . Tlumivka je tvořena svinutými přívodními vodiči, o zhruba deseti závitech, mezi stykačem a kondenzátorem, viz obr. 9.1.



Obr. 9.1 Stykač se vzduchovou tlumivkou tvořenou svinutými přívodními vodiči [16]

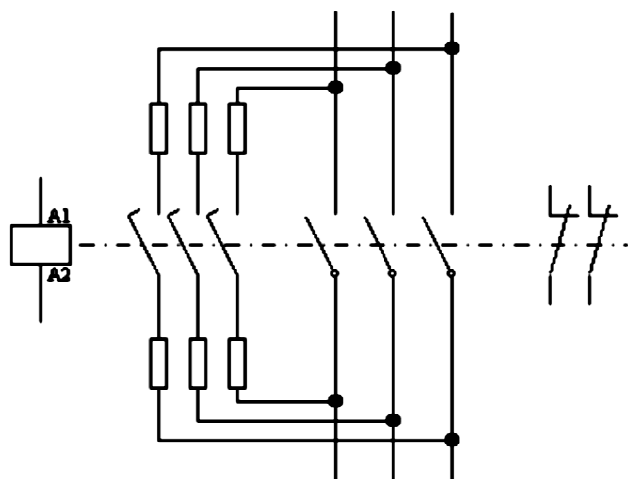
Účinek těchto tlumivek však bývá poměrně malý, omezení amplitudy proudu je dle [3] okolo 30%. Další možnost jak trvale zvýšit impedanci je zařazení tlumivky s feromagnetickým jádrem před kondenzátor. Nevýhoda tohoto řešení jsou rozměry, hmotnost a vyšší cena tlumivky. To je důvod proč se tlumivka pouze k omezení zapínacího proudu nepoužívá. Najdeme ji však u hrazené kompenzace, kde je její účel zabránit proudovému přetěžování kondenzátorů vyššími harmonickými. Mimo tuto funkci pak tlumivka plní i funkci omezení amplitudy proudu přechodného děje při připínání kondenzátorů. Příkladem přechodného zvýšení impedance během spínání je použití tzv. odporového spínání, které je popsáno v následující kapitole.

9.2 Spínání stykači s odporovým spínáním

Toto řešení je dnes nejpoužívanější, a to jak u nechráněné tak i chráněné kompenzace na hladině nn. U chráněné kompenzace je sice do obvodu již impedance v podobě tlumivky zařazena, avšak použití odporového spínání zde má opodstatnění ve snížení první amplitudy zapínacího proudu a omezení nebezpečí přesycení tlumivek během spínání. I u odporového spínání je ale stále omezení v podobě maximálního počtu sepnutí za hodinu, což v současnosti je 100 až 250 sepnutí za hodinu, přičemž s vyšším spínaným výkonem počet spínacích cyklů klesá.

Princip činnosti spočívá ve spínání ve dvou fázích. Stykač má dvě sady kontaktů, hlavní a předstihové. Nejprve se kondenzátor připíná přes předstihový kontakt, který je v sérii s omezovacím rezistorem, který musí být vhodně navržen, aby nedošlo k jeho tepelnému poškození. Rezistor bývá součástí stykače a je to v podstatě izolovaný odporový vodič. Rezistor omezí největší náraz proudu při zapínání. Po odeznění tohoto rázu se spínají hlavní kontakty stykače, a rozpínají předstihové kontakty, kondenzátor je připojen na plné napětí sítě. Hlavní kontakty již spínají ustálený proud kondenzátorem a nejsou tedy proudově přetěžovány.

Z principu činnosti odporového spínání plyne, že vzniknou dva po sobě následující přechodové děje. Je snahou, aby první přechodný děj měl aperiodický nekmitavý průběh a aby druhý přechodný děj měl co nejmenší počáteční amplitudu. Toho se dosáhne vhodnou volbou omezovacích rezistorů a časovou posloupností spínání.



Obr. 9.2 Principiální zapojení stykače s odporovým spínáním [3]



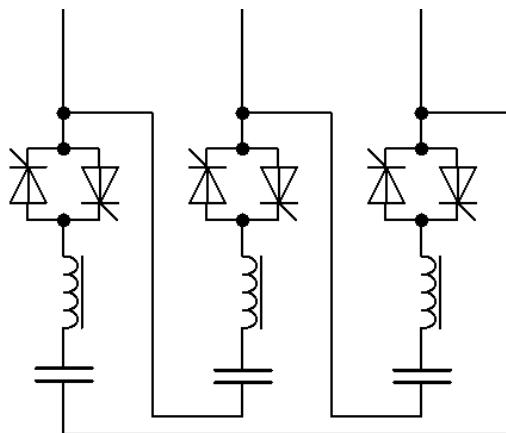
Obr. 9.3 Stykač s odporovým spínáním [16]

Dříve se odporové spínání realizovalo dvojicí klasických stykačů. První stykač spínal obvod se vřazeným rezistorem a druhý stykač s určitým časovým zpožděním rezistor

vyřadil. Tento způsob se však neosvědčil, protože je zde větší prostorová náročnost a komplikovanější zapojení. Navíc použití dvou stykačů místo jednoho zvyšuje pravděpodobnost poruchy. Na hladině vn se stykače s odporovým spínáním nepoužívají, místo nich se zde používají vakuové stykače. Tyto stykače mají kontakty umístěné ve vakuové zhášecí komoře, ve vakuu by teoreticky el. oblouk neměl vzniknout. Problém však je, že zde dochází k uvolnění vodivých iontů z materiálu kontaktů, takže el. oblouk pak může vzniknout. Na hladině vn se vakuové stykače používají zejména při častém spínání. Obecně lze říci, že při použití všech typů stykačů nelze dosáhnout potřebné dynamiky regulace kompenzačního výkonu zejména v náročných aplikacích. Může zde docházet ke zpoždění při spínání a tím pádem dojde k nedokompenzování. Proto se tam, kde je to nutné používá bezkontaktní spínání.

9.3 Bezkontaktní spínání

V tomto případě je stykač nahrazen bezkontaktním spínačem, takže spínání a odpínání kondenzátorů může probíhat mnohem rychleji než při použití stykače. Toto řešení se používá zejména při rychlé kompenzaci s chráněnými kompenzačními sekcemi. Spínač je tvořen dvojicí antiparalelně zapojených tyristorů, každý tyristor spíná v jedné půlčlenné síťového napětí. Tyristory jsou řízeny prostřednictvím spínacích impulzů, spínání je ovládáno mikroprocesorem. Takže sepnutí může nastat v definovaný okamžik, čímž lze omezit přechodný děj.



Obr. 9.4 Principiální zapojení bezkontaktního spínače

Přechodový jev při spínání kondenzátoru nenastane, pokud je připínaný kondenzátor nabit na napětí sítě, nebo v případě hrazené kompenzace na napětí vyšší než je napětí sítě. Tento způsob je z hlediska připínání k síti nejvýhodnější a proto jej také řada výrobců

používá. Tyristor pak po přivedení spínacího impulsu spíná v nejbližším okamžiku kdy napětí sítě dosáhne napětí na kondenzátoru. Kompenzační stupeň je možno sepnout i bez jeho předchozího vybití, to zlepšuje dynamiku kompenzace.

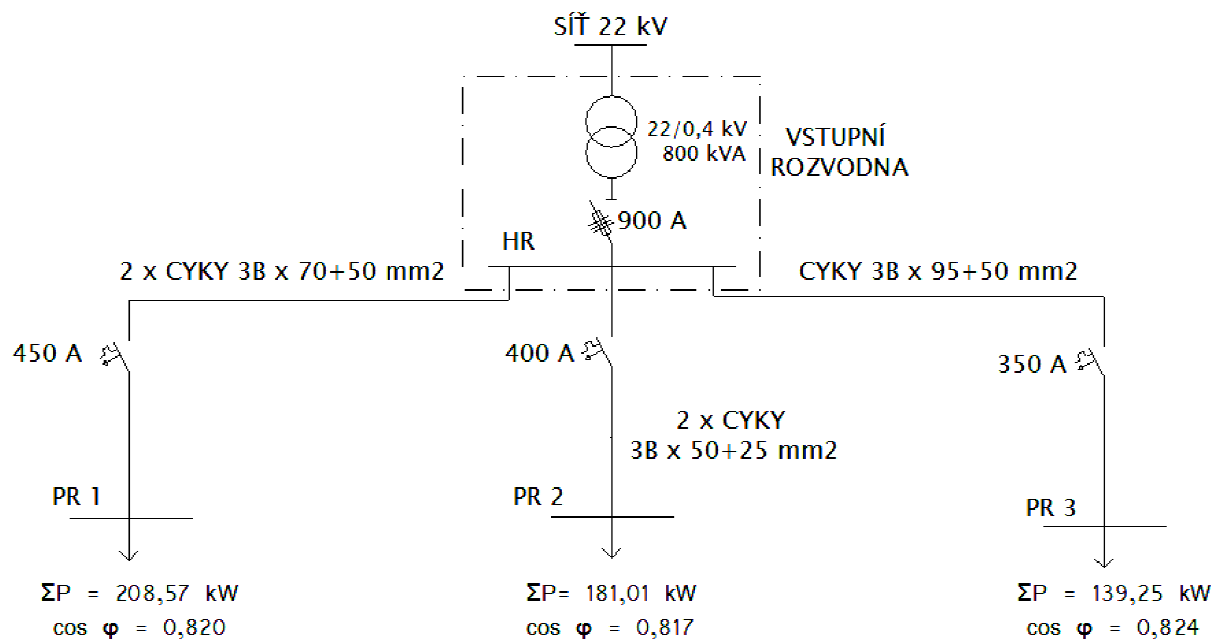
Dále se v praxi používá spínání vybitého kondenzátoru v okamžiku průchodu síťového napětí nulou. V tomto případě již přechodný děj nastane, ale jeho počáteční amplituda není příliš velká, takže vliv na napájecí síť je malý. Řídící obvod pro tyristory je poměrně jednoduchý, protože je zde podmínka sepnutí tyristoru v nule napětí sítě. Tyristorový spínač je tak synchronizován se sítí. Je zde již omezení v rychlosti kompenzace, protože po odepnutí kondenzátoru není možné jej okamžitě sepnout, neboť jeho napětí není nulové, ale exponenciálně klesá.

Nevýhoda tyristorových spínačů je v tom, že na rozdíl od stykačů jsou náchylné na překročení maximálního proudu nebo strmosti nárůstu tohoto proudu di/dt . Překročení této povolené strmosti může mít za následek destrukci polovodiče, proto se bezkontaktní spínání má používat pro chráněné kompenzační sekce, protože ochranná tlumivka v sérii s tyristorovým spínačem omezí strmost nárůstu proudu. V porovnání se stykačem vznikají na tyristorovém spínači také větší ztráty, takže je nutné zajistit dostatečné chlazení tyristorových modulů, z tohoto důvodu je někdy použit k ofukování chladiče přídavný ventilátor. Výhoda použití bezkontaktního spínání je, že zde nejsou pohyblivé části jako u stykače, z toho plyne vyšší spolehlivost a kratší prodleva při spínání. V současné době stále ještě vybavení kompenzačního rozvaděče bezkontaktním spínáním představuje větší investici než klasické stykače, proto tam, kde nejsou velké nároky na rychlost kompenzace se používá častěji kontaktní spínání.

10 Návrh skupinové nehrazené kompenzace

Návrh kompenzačního zařízení jsem provedl pro firmu Václav Chmela – Galvanovna s. r. o, se sídlem v Písku. Firma se zabývá povrchovou úpravou kovů. Jedná se především o hromadné zinkování, niklování a stříbření malých dílů v bubnech. Vlastní provoz je rozdělen do tří samostatných budov, každá budova má svůj vlastní rozvaděč. Tyto rozvaděče jsou umístěny vždy přímo v budově, kterou napájí. Skupinová kompenzace je tedy navrhována pro každou budovu resp. rozvaděč zvlášť. Navržené kompenzační rozvaděče pak budou připojeny k rozvaděčům PR1, PR2 a PR3, viz přehledové schéma v příloze č. 4.

Napájení podniku je zajištěno z distribuční sítě 22kV přes jeden transformátor 22/0,4 kV 800 kVA, umístěný ve vstupní transformovně. Zde je také umístěn hlavní rozvaděč nízkého napětí HR. Z hlavního rozvaděče je kabelovými vedeními zajištěno napájení již zmíněných rozvaděčů PR1, PR2 a PR3. Při návrhu jsem vycházel z údajů, které jsem získal ze zapůjčených revizních zpráv a z údajů získaných přímo v provozu ze štítků spotřebičů. V níže uvedeném přehledovém schématu jsou zakresleny jednotlivé rozvaděče a celkové vypočtené výkony, které jsou z nich odebírané. Pro každý rozvaděč je také uveden vypočtený účinník před kompenzací. Výpočet těchto hodnot je uveden vždy u příslušného rozvaděče.



Obr. 10.1 Přehledové schéma napájení podniku

10.1 Kompenzace na rozvaděči PR1

Navrhovaná skupinová kompenzace bude kompenzovat spotřebiče napojené na rozvaděč PR 1, přívod k rozvaděči je proveden dvěma paralelními kabely CYKY 3B x 70 + 35 mm². Jedná se o technologii linky zinek – nikl (pohony bubnů, odsávání, čerpadla atd.). Dále je na rozvaděč PR 1, který má tři pole, napojena malá údržbářská dílna, kde je instalováno několik menších kovoobráběcích strojů. Do posledního pole rozvaděče jsou napojeny dvě velké odstředivky, každá o instalovaném výkonu elektromotoru 22 kW.

Pro určení potřebného výkonu kompenzačního zařízení, které bude připojeno na rozvaděč PR 1 jsem sestavil přehledovou tabulku spotřebičů, které se nachází v budově č. 1. a jsou tedy napojeny do rozvaděče PR 1, který je instalován rovněž v budově č.1. Pro lepší orientaci ve výpočtech jsou níže uvedeny vysvětlivky k tabulce.

Tab. 10.1 Parametry spotřebičů napojených na rozvaděč PR 1

Pole rozv.	Č.	Spotřebiče	Počet	cos φ [-]	tg φ [-]	η [-]	P _i [kW]	P _{ic} [kW]	P _{elc} [kW]	Q _c [kVAr]	S _c [kVA]
1	1	Dílna – soustruh	1	0,85	0,62	0,86	6	6	6,98	4,32	8,21
	2	Dílna – vrtačka	1	0,8	0,75	0,75	1,5	1,5	2,00	1,50	2,50
	3	Dílna – frézka	1	0,82	0,70	0,84	4,2	4,2	5,00	3,49	6,10
	4	Dílna – bruska	1	0,81	0,72	0,78	2,2	2,2	2,82	2,04	3,48
	5	Dílna – kompresor	1	0,85	0,62	0,87	7,5	7,5	8,62	5,34	10,14
	6	Osvětlení	Σ	0,95	0,33	0,7	3,8	3,8	5,43	1,78	5,71
2	7	Pohony bubnů	30	0,8	0,75	0,82	2,2	66	80,49	60,37	100,61
	8	Ventilátory I	4	0,82	0,70	0,86	7,5	30	34,88	24,35	42,54
	9	Ventilátory II	15	0,78	0,80	0,74	1,1	16,5	22,30	17,89	28,59
	10	Manipulátory	8	0,75	0,88	0,72	0,55	4,4	6,11	5,39	8,15
	11	Čerpadla I	15	0,8	0,75	0,75	0,75	11,25	15,00	11,25	18,75
	12	Čerpadla II	8	0,8	0,75	0,78	1,3	10,4	13,33	10,00	16,67
	13	Míchání lázní	15	0,8	0,75	0,74	1,1	16,5	22,30	16,72	27,87
	14	Čerpadla ostřik	4	0,8	0,75	0,76	0,75	3	3,95	2,96	4,93
3	15	Odstředivky	2	0,88	0,54	0,9	22	44	48,89	26,39	55,56

Vysvětlivky k tabulce:

cos φ – Účinník jednoho spotřebiče, štítková hodnota. V případě osvětlení příp. elektrických topných těles, celkový účinník skupiny spotřebičů.

tg φ – Pomocná hodnota pro výpočty, určen z hodnoty cos φ.

η – Účinnost spotřebiče nebo skupiny spotřebičů.

P_i – Instalovaný výkon jednoho spotřebiče, šítková hodnota. V případě osvětlení příp. el. topných těles, celkový instalovaný výkon.

P_{ic} – Celkový instalovaný výkon jednoho druhu spotřebiče, např. pohonů bubnů nebo čerpadel.

P_{elc} – Celkový činný příkon spotřebiče nebo skupiny spotřebičů (osvětlení, příp. topná tělesa).

Q_c – Celkový jalový příkon spotřebiče nebo skupiny spotřebičů.

S_c – Celkový zdánlivý příkon spotřebiče nebo skupiny spotřebičů.

10.1.1 Výpočet hodnot v tabulce

Výpočet pro tento rozvaděč jsem provedl jako vzorový. Pro další dva rozvaděče již nebude výpočet proveden tak podrobně, protože princip je stejný. Údaje, z kterých jsou dopočteny hodnoty ve všech řádkách a sloupcích tabulky, jsou: počet instalovaných spotřebičů, instalovaný výkon jednoho spotřebiče, účinnost a účiník. Vzorový výpočet hodnot v tabulce je proveden pro řádek č. 1 – soustruh v dílně.

Výchozí hodnoty pro výpočet dalších údajů v řádku č 1. jsou tyto:

Počet spotřebičů: $n = 1$

Účiník: $\cos \varphi = 0,85$

Účinnost: $\eta = 0,86$

Instalovaný výkon: $P_i = 6 \text{ kW}$

Pomocná hodnota $\text{tg } \varphi$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{1 - 0,85^2}}{0,85} = 0,619$$

Celkový instalovaný výkon

$$P_{ic} = n \cdot P_i = 1 \cdot 6 = 6 \text{ kW}$$

Celkový činný příkon

$$P_{elc} = \frac{P_{ic}}{\eta} = \frac{6}{0,86} = 6,98 \text{ kW}$$

Celkový jalový příkon

$$Q_c = P_{elc} \cdot \text{tg } \varphi = 6,98 \cdot 0,619 = 4,32 \text{ kVAr}$$

Celkový zdánlivý příkon

$$S_c = \frac{P_{elc}}{\cos \varphi} = \frac{6,98}{0,85} = 8,21 \text{ kW}$$

Tímto postupem byly dopočteny potřebné hodnoty ve všech řádcích tabulky i při sestavování tabulek pro ostatních dva rozvaděče PR 2 a PR 3. Výpočty jsou prováděny vždy se zaokrouhlením na dvě platná desetinná místa, účinník a pomocná hodnota $\text{tg } \varphi$ jsou počítány na tři platná desetinná místa.

10.1.2 Výpočet kompenzačního výkonu

Potřebný kompenzační výkon, který budou muset kondenzátory dodat, lze vypočítat několika způsoby. Zde jsou pro porovnání a ověření správnosti ukázány čtyři postupy. Pro zbylé dva rozvaděče použijí již jen nejpřesnější způsob výpočtu, a to způsob č. 1. Ve všech výpočtech uvažují součinitel náročnost $\beta = 0,75$ a rezervu potřebného kompenzačního výkonu 20 %. Napětí sítě uvažují ve všech výpočtech 400 V, tzn., že pro zjednodušení zanedbáme úbytky napětí.

1. Způsob výpočtu**Celkový činný příkon**

$$P_{R1} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{15} P_{elck} = 0,75 \cdot (6,98 + 2 + 5 + 2,82 + 8,62 + 5,43 + 80,49 + 34,88 + 22,3 +$$

$$+ 6,11 + 15 + 13,33 + 22,3 + 3,95 + 48,89) = 208,57 \text{ kW}$$

Celkový jalový příkon

$$Q_{R1} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{15} Q_{ck} = 0,75 \cdot (4,32 + 1,5 + 3,49 + 2,04 + 5,34 + 1,78 + 60,37 + 24,35 +$$

$$+ 17,89 + 5,39 + 11,25 + 10 + 16,72 + 2,96 + 26,39) = 145,35 \text{ kVAr}$$

Celkový zdánlivý příkon

$$S_{R1} = \sqrt{P_{R1}^2 + Q_{R1}^2} = \sqrt{208,57^2 + 145,35^2} = 254,22 \text{ kVA}$$

Proud odebíraný z rozvaděče

$$I_{R1} = \frac{S_{R1}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{254,22}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 366,93 \text{ A}$$

Střední účinník

$$\cos \varphi_{R1} = \frac{P_{R1}}{S_{R1}} = \frac{208,57}{254,22} = 0,82$$

Pomocné hodnoty

$$\operatorname{tg} \varphi_{R1} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{R1})^2}}{\cos \varphi_{R1}} = \frac{\sqrt{1 - 0,82^2}}{0,82} = 0,698$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{0,95} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{0,95})^2}}{\cos \varphi_{0,95}} = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} = 0,329$$

Potřebný kompenzační výkon

$$Q_{kom1} = P_{R1} (\operatorname{tg} \varphi_{R1} - \operatorname{tg} \varphi_{0,95}) = 208,57 (0,698 - 0,329) = 76,96 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 %

$$Q_{kom1,20\%} = 1,2 \cdot Q_{kom1} = 1,2 \cdot 76,96 = 92,35 \text{ kVAr}$$

2. způsob výpočtu**Celkový činný příkon**

Viz způsob výpočtu č. 1

$$P_{R1} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{15} P_{elck} = 208,57 \text{ kW}$$

Celkový zdánlivý příkon

Tento zdánlivý příkon stanovíme jako součet dílčích zdánlivých příkonů uvedených v tabulce.

$$S_{R1} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{15} S_{ck} = 0,75 \cdot (8,21 + 2,5 + 6,1 + 3,48 + 10,14 + 5,71 + 100,61 + \\ + 42,54 + 28,59 + 8,15 + 18,75 + 16,67 + 27,87 + 4,93 + 55,56) = 254,86 \text{ kVA}$$

Proud odebíraný z rozvaděče

$$I_{R1} = \frac{S_{R1}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{254,86}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 367,86 \text{ A}$$

Střední účinník

$$\cos \varphi_{R1} = \frac{P_{R1}}{S_{R1}} = \frac{208,57}{254,86} = 0,818$$

Pomocné hodnoty

$$\operatorname{tg} \varphi_{R1} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{R1})^2}}{\cos \varphi_{R1}} = \frac{\sqrt{1 - 0,818^2}}{0,818} = 0,703$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{0,95} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{0,95})^2}}{\cos \varphi_{0,95}} = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} = 0,329$$

Potřebný kompenzační výkon

$$Q_{kom1} = P_{R1} (\operatorname{tg} \varphi_{R1} - \operatorname{tg} \varphi_{0,95}) = 208,57(0,703 - 0,329) = 78,01 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 %

$$Q_{kom1_20\%} = 1,2 \cdot Q_{kom1} = 1,2 \cdot 78,01 = 93,61 \text{ kVAr}$$

3. způsob výpočtu**Střední účinník**

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{R1} &= \frac{n_1 \cdot \cos \varphi_1 + n_2 \cdot \cos \varphi_2 + \dots + n_{15} \cdot \cos \varphi_{15}}{\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + \dots + \cos \varphi_{15}} = \\ &= \frac{0,85 + 0,8 + 0,82 + 0,81 + 0,85 + 0,95 + 30 \cdot 0,8 + 4 \cdot 0,82 + 15 \cdot 0,78 + 8 \cdot 0,75 + 15 \cdot 0,8}{0,85 + 0,8 + 0,82 + 0,81 + 0,85 + 0,95 + 0,8 + 0,82 + 0,78 + 0,75 + 0,8 + 0,8 + 0,8 + 0,8 + 0,88} + \\ &+ \frac{8 \cdot 0,8 + 15 \cdot 0,8 + 4 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,88}{0,85 + 0,8 + 0,82 + 0,81 + 0,85 + 0,95 + 0,8 + 0,82 + 0,78 + 0,75 + 0,8 + 0,8 + 0,8 + 0,8 + 0,88} = \\ &= 0,798 \end{aligned}$$

Střední účinnost

$$\eta_{stř} = \frac{\eta_{min} + \eta_{max}}{2} = \frac{0,7 + 0,9}{2} = 0,8$$

η_{min} – Minimální účinnost spotřebiče v tabulce.

η_{max} – Maximální účinnost spotřebiče v tabulce.

Celkový činný příkon

$$P_{R1} = \beta \cdot \frac{\sum_{k=1}^{15} P_{ik}}{\eta_{stř}} = 0,75 \cdot \frac{227,25}{0,8} = 213,05 \text{ kW}$$

Celkový zdánlivý příkon

$$S_{R1} = \frac{P_{R1}}{\cos \varphi_{R1}} = \frac{213,05}{0,798} = 266,87 \text{ kVA}$$

Proud odebíraný z rozvaděče

$$I_{R1} = \frac{S_{R1}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{266,87}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 385,19 \text{ A}$$

Pomocné hodnoty

$$\operatorname{tg} \varphi_{R1} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{R1})^2}}{\cos \varphi_{R1}} = \frac{\sqrt{1 - 0,798^2}}{0,798} = 0,755$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{0,95} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{0,95})^2}}{\cos \varphi_{0,95}} = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} = 0,329$$

Potřebný kompenzační výkon

$$Q_{kom1} = P_{R1} (\operatorname{tg} \varphi_{R1} - \operatorname{tg} \varphi_{0,95}) = 213,05 (0,755 - 0,329) = 90,76 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 %

$$Q_{kom1,20\%} = 1,2 \cdot Q_{kom1} = 1,2 \cdot 90,76 = 108,91 \text{ kVAr}$$

4. způsob výpočtu

Vycházíme ze skutečnosti, že velikost činného výkonu se před a po kompenzaci nemění a že kompenzujeme na požadovaný účinník $\cos \varphi = 0,95$. Potřebný kompenzační výkon pak určíme jako rozdíl vypočteného celkového jalového příkonu před kompenzací a po kompenzaci.

Celkový činný příkon – viz způsob č. 1

$$P_{R1} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{15} P_{elc_k} = 208,57 \text{ kW}$$

Celkový jalový příkon před kompenzací – viz způsob č. 1

$$Q_{R1} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{15} Q_{c_k} = 145,35 \text{ kVAr}$$

Celkový zdánlivý příkon před kompenzací

$$S_{R1} = \sqrt{P_{R1}^2 + Q_{R1}^2} = \sqrt{208,57^2 + 145,35^2} = 254,22 \text{ kVA}$$

Proud odebíraný z rozvaděče

$$I_{R1} = \frac{S_{R1}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{254,22}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 366,93 \text{ A}$$

Celkový zdánlivý příkon po kompenzaci

$$S_{R1k} = \frac{P_{R1}}{\cos \varphi_{0,95}} = \frac{208,57}{0,95} = 219,55 \text{ kVA}$$

Celkový jalový příkon po kompenzaci

$$Q_{R1k} = \sqrt{S_{R1k}^2 - P_{R1}^2} = \sqrt{219,55^2 - 208,57^2} = 68,58 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon

$$Q_{kom1} = Q_{R1} - Q_{R1k} = 145,35 - 68,58 = 76,77 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 %

$$Q_{kom1,20\%} = 1,2 \cdot Q_{kom1} = 1,2 \cdot 76,77 = 92,12 \text{ kVAr}$$

Porovnání vypočtených hodnot pro rozvaděč PR 1

Z tabulky je zřejmé, že vypočtený kompenzační výkon se liší u výpočtových způsobů č. 1, 2 a 4 jen velmi málo, takže to nemá na praktický návrh kompenzačních stupňů vliv. Výsledek výpočtového postupu č. 3 se od ostatních výsledků liší značně. Tento postup je proto při tomto návrhu nevhodný, resp. nepřesný.

Tab. 10.2 Porovnání vypočtených hodnot

Způsob č.	P_{R1} [kW]	S_{R1} [kVA]	I_{R1} [A]	$\cos \varphi_{R1}$ [-]	Q_{kom1} [kVAr]	$Q_{kom1,20\%}$ [kVAr]
1	208,57	254,22	366,93	0,82	76,96	92,35
2	208,57	254,86	367,86	0,818	78,01	93,61
3	213,05	266,87	385,19	0,798	90,76	108,91
4	208,57	254,22	366,93	nepočítá se	76,77	92,12

10.1.3 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů

Nejprve je třeba zvolit vhodný typ kompenzačního rozvaděče. Vycházíme přitom z potřebného kompenzačního výkonu s rezervou 20 %, který byl stanoven výpočtovým způsobem č. 1 v kap. 10.1.2. Tento výkon je 92,35 kVAr. Dále je nutné vybrat další kompenzační komponenty, jako jsou kondenzátory, stykače, pojistky atd. Při volbě těchto komponent se již řídíme použitým typem rozvaděče a především zvolenou velikostí jednotlivých kompenzačních stupňů. Rozvaděč a další komponenty jsem vybíral z katalogu firmy ZEZ – Silko [16], v případě prvků pro jištění jsem použil katalogy firmy OEZ [20], [21] a [23].

1) Kompenzační rozvaděč

Z katalogu firmy ZEZ – Silko jsem zvolil rozvaděč QRS 100 s níže uvedenými parametry, přičemž počet stupňů, jejich váhu a velikost základního stupně jsem zvolil jinak, než je v katalogu, aby bylo dosaženo předepsané hodnoty účinníku. Instalovaný výkon je výkon, který by v rozvaděči byl při instalování kondenzátorů, které jsou pro daný rozvaděč uvedeny v katalogu. Protože já jsem zvolil jiné kondenzátory, uvádím zde vždy i skutečný kompenzační výkon. Tento výkon je celkový výkon skutečně instalovaných kompenzačních kondenzátorů. Vždy musí být menší než instalovaný výkon, na který je rozvaděč navržen.

- Instalovaný výkon: 100 kVAr
- Skutečný výkon: 97,5 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: 1:2:4:8:8:16
- Základní stupeň: 2,5 kVAr
- Rozměry: 800 x 2090 x 200 mm

Jako hlavní vypínač pro kompenzační rozvaděč jsem zvolil výkonový vypínač typu LN – 250 – I od výrobce Moeller [17]. Vypínač má jmenovitý proud 250 A, což je pro instalovaný kompenzační výkon i s jistou rezervou dostatečné, protože proud celého kompenzačního rozvaděče při sepnutí všech stupňů je:

$$I_{j1} = \frac{Q_{komc}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{97,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 140,73 \text{ A}$$

Kde Q_{komc} je celkový kompenzační výkon.

2) Kondenzátory

Je třeba zvolit kondenzátory pro každý kompenzační stupeň, vybíral jsem z katalogu firmy ZEZ – Silko [16] v nabídce kondenzátorů pro nehrazenou kompenzaci pro 400 V. Při výběru jsem se řídil výkonem jednotlivých kompenzačních stupňů, takže vybrané kondenzátory zde mají stejné výkony jako kompenzační stupně. Pro jeden stupeň je tedy použit vždy jeden kondenzátor. Zvolené typy kondenzátorů a jejich parametry uvádím v následující tabulce:

Tab. 10.3 Vybrané typy kondenzátorů a jejich parametry

Stupeň č.	Váha stupně	Výkon stupně [kVAr]	Typ kondenzátoru	Výkon [kVAr]	Kapacita [μ F]	Jmen. proud [A]
1	1	2,5	CSADG 1-0,4/2,5	2,5	3 x 16,6	3,6
2	2	5	CSADG 1-0,4/5	5	3 x 33,2	7,2
3	4	10	CSADG 1-0,4/10	10	3 x 66,3	14,4
4	8	20	CSADG 1-0,4/20	20	3 x 132,6	28,9
5	8	20	CSADG 1-0,4/20	20	3 x 132,6	28,9
6	16	40	CSADG 1-0,4/40	40	3 x 198,9	43,3

Než bude provedena volba dalších komponentů, je třeba výpočtem zkontrolovat, zda při použití vybraných kondenzátorů bude účinník při minimálním a maximálním předpokládaném odběru z rozvaděče v povolených mezích.

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení

Minimální zatížení rozvaděče PR 1 a dalších dvou rozvaděčů jsem stanovil na základě odhadu minimálního zatížení celého podniku $P_{cmin} = 12$ kW. Abych určil minimální činné příkony na jednotlivých rozvaděčích, tak jsem nejprve sečetl celkové činné příkony pro všechny rozvaděče:

$$P_c = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} = 208,57 + 181,01 + 139,25 = 528,83 \text{ kW}$$

Dále jsem určil poměrný podíl každého rozvaděče na odebíraném celkovém výkonu:

$$r_x = \frac{P_{Rx}}{P_c}$$

kde $x \in (1;3)$ a značí číslo příslušného rozvaděče

Minimální činný příkon pro každý rozvaděč jsem pak určil dle vztahu:

$$P_{Rxmin} = r_x \cdot P_{cmin} \text{ [kW]}$$

Určíme hodnotu minimálního jalového výkonu:

$$Q_{Rxmin} = P_{Rxmin} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{Rx}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě při minimálním odběru z rozvaděče:

$$Q_{sxmin} = Q_{Rxmin} - Q_{k1.x}$$

Kde $Q_{k1.x}$ je výkon nejmenšího kompenzačního stupně v kompenzačním rozvaděči.

Hodnota účinníku při minimálním zatížení:

$$\cos \varphi_{Rx_{min}} = \frac{P_{Rx_{min}}}{\sqrt{P_{Rx_{min}}^2 + Q_{Sx_{min}}^2}}$$

Výpočet konkrétních hodnot pro rozvaděč č. 1

Poměrný podíl rozvaděče

$$r_1 = \frac{P_{R1}}{P_c} = \frac{208,57}{528,83} = 0,394$$

Minimální činný příkon

$$P_{R1_{min}} = r_1 \cdot P_{c_{min}} = 0,394 \cdot 12 = 4,73 \text{ kW}$$

Minimální jalový příkon

$$Q_{R1_{min}} = P_{R1_{min}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{R1} = 4,73 \cdot 0,698 = 3,3 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{S1_{min}} = Q_{R1_{min}} - Q_{k1.1} = 3,3 - 2,5 = 0,8 \text{ kVAr}$$

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{R1_{min}} = \frac{P_{R1_{min}}}{\sqrt{P_{R1_{min}}^2 + Q_{S1_{min}}^2}} = \frac{4,73}{\sqrt{4,73^2 + 0,8^2}} = 0,986$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je tedy vyhovující.

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení

Jako maximální zatížení uvažujeme dříve vypočtené zatížení pomocí způsobu č. 1, viz kap. 10.1.2. Pro výpočet potřebujeme znát tyto hodnoty: Celkový činný a jalový příkon pro jednotlivé rozvaděče, a celkový kompenzační výkon skutečně instalovaných kondenzátorů. Stejným principem jako v případě minimálního zatížení pak určíme jalový výkon dodávaný ze sítě a účinník po kompenzaci.

Výpočet konkrétních hodnot pro rozvaděč č. 1

Celkový činný příkon - viz kap. 10.1.2

$$P_{R1} = 208,57 \text{ kW}$$

Jalový příkon před kompenzací - viz kap. 10.1.2

$$Q_{R1} = 145,35 \text{ kVAr}$$

Celkový kompenzační výkon

Je to součet výkonů kompenzačních kondenzátorů, které budou v rozvaděči skutečně instalovány, viz tabulka 10.3.

$$Q_{komc} = 2,5 + 5 + 10 + 20 + 20 + 40 = 97,5 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{s1max} = Q_{R1} - Q_{komc} = 145,35 - 97,5 = 47,85 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{R1max} = \frac{P_{R1}}{\sqrt{P_{R1}^2 + Q_{s1max}^2}} = \frac{208,57}{\sqrt{208,57^2 + 47,85^2}} = 0,975$$

Účinník leží v povoleném pásmu 0,95 až 1, použité kompenzační kondenzátory tedy vyhovují.

3) Stykače

Stykače vybereme dle úrovně napětí, na kterém kompenzaci navrhujeme, v našem případě 400 V, a podle jmenovitého proudu kondenzátorů, který budou spínat. Základní podmínka je, že jmenovitý proud stykače musí být větší než jmenovitý proud kondenzátoru, resp. kompenzačního stupně, který má stykač spínat, toto jsem tedy při návrhu respektoval.

Jmenovitý proud kondenzátorů je uveden v [16]. Výběr stykačů jsem provedl rovněž z tohoto katalogu.

Tab. 10.4 Vybrané typy stykačů

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	2,5	3,6	K3-18K10 230	18
2	5	7,2	K3-18K10 230	18
3	10	14,4	K3-18K10 230	18
4	20	28,9	K3-32K00 230	35
5	20	28,9	K3-32K00 230	35
6	40	43,3	K3-50K00 230	48

4) Jištění

Jmenovitý proud pojistky pro kondenzátory I_{Np} se má volit jako 1,6 až 1,8 násobek proudu kondenzátoru I_c :

$$1,6 \cdot I_c \leq I_{Np} \leq 1,8 \cdot I_c$$

Výrobce kondenzátorů ve svém katalogu [16] na str. 5 udává tabulku, ve které jsou kondenzátorům dle výkonu již přímo přiřazeny hodnoty pojistek, tato tabulka je rovněž uvedena v příloze č. 2. Při volbě pojistek jsem se tedy řídil dle této tabulky. Konkrétní typy pojistek jsem vybíral z katalogu firmy OEZ [21] kde jsou v nabídce výkonové nožové pojistky s vypínací charakteristikou gG⁸ typu PNA000 XXA gG. Pojistky budou ve všech fázích každého kompenzačního stupně, tj. celkem 3 x 6 = 18 pojistek. Umístěny budou v třípólových pojistkových odpínačích typu FH000-3A/T, tento odpínač je pro nožové pojistky velikosti 000 do 160 A a je vybrán z katalogu firmy OEZ [20]. Pro každý kompenzační stupeň bude instalován jeden tento odpínač, tj. celkem bude v rozvaděči šest pojistkových odpínačů.

Tab. 10.5 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	2,5	3,6	PNA000 6A gG	6
2	5	7,2	PNA000 16A gG	16
3	10	14,4	PNA000 25A gG	25
4	20	28,9	PNA000 50A gG	50
5	20	28,9	PNA000 50A gG	50
6	40	43,3	PNA000 100A gG	100

5) Regulátor

Při výběru vhodného regulátoru vycházíme ze skutečnosti, že bude potřeba spínat šest kompenzačních stupňů. Musíme proto vybrat regulátor, který je vybaven nejméně šesti výstupy. Vybral jsem regulátor typu NOVAR 1106 od českého výrobce KMB systems, regulátory NOVAR se v praxi osvědčily a jsou často používané.

Regulátor NOVAR 1106 má šest reléových výstupů pro ovládání stykačů. Je plně automatický, rovněž instalace přístroje je automatizovaná. Regulátor si sám zjistí způsob

⁸ Pojistka s charakteristikou gG se používá pro jištění zařízení před přetížením a zkratem [21].

připojení i velikost jednotlivých připojených kompenzačních kondenzátorů. Měřící napětí se získá z napájecího napětí, tj. měří se mezi jednou fází a středním vodičem. Pro měření proudu je nutné do Jedné fáze instalovat měřící transformátor proudu, se jmenovitým výstupním proudem 1A nebo 5A. Měřící transformátor je nutný pro měření proudu, který potom regulátor vyhodnocuje.

Vybral jsem měřící transformátor proudu z nabídky katalogu [19], konkrétně typ CLB 5.91 s primárním proudem 500 A a sekundárním proudem 5 A, třída přesnosti je 0,5. Měřící transformátor je v násuvném provedení. Převod měřícího transformátoru je nutné zadat při nastavování regulátoru, aby měřené veličiny byly zobrazeny správně. Měřící transformátor bude připojen na fázovou sběrnici v přívodním poli rozvaděče, tak aby měřil vždy celkový proud tekoucí do rozvaděče. Schéma instalace regulátoru je uvedeno v příloze č. 6.

Jištění regulátoru je provedeno jednofázovým jističem typu PL 7 s jmenovitým proudem 6A. Další detailní technické údaje o regulátoru zde nejsou rozepsány, protože je lze nalézt v manuálu k přístroji [15], kde jsou i pokyny pro instalaci a uvedení do provozu.

10.1.4 Cenová kalkulace

Tab. 10.6 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Kondenzátor	CSADG 1-0,4/2,5	1	490	490
	CSADG 1-0,4/5	1	610	610
	CSADG 1-0,4/10	1	820	820
	CSADG 1-0,4/20	2	1 300	2 600
	CSADG 1-0,4/40	1	3 570	3 570
Stykač	K3-18K10 230	3	790	2 370
	K3-32K00 230	2	1 170	2 340
	K3-50K00 230	1	1 960	1 960
Pojistka	PNA000 6A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 16A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 25A gG	3	36,96	110,88
	PNA000 50A gG	6	36,96	221,76
	PNA000 100A gG	3	39,48	118,44
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	6	600,13	3 600,78
Hlavní vypínač	LN 250 - I	1	3 515	3 515
Regulátor	NOVAR 1106	1	4 320	4 320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřící transformátor	CLB 5.91	1	722	722
Komp. rozvaděč	QRS 100	1	8 832	8 832
Výsledná cena				36 523,96

Ceny kompenzačních komponentů jsem bral podle ceníku komponent pro kompenzaci [24] a [25], dále dle [17], [18], [19], [22] a [26]. Veškeré ceny jsou bez DPH, takto jsem stanovil ceny kompenzačních komponentů i u rozvaděčů PR 2 a PR 3.

10.2 Kompenzace na rozvaděči PR 2

Rozvaděč PR 2 o osmi polích, je připojen dvěma kabely CYKY 3B x 50 + 25 mm². Na rozvaděč je napojena elektroinstalace budovy galvanovny, v této budově se provádí hromadné zinkování v bubnech a pasivace zinkových dílů. Jak již bylo uvedeno, dále bude kompenzační výkon počítán pouze jedním způsobem.

Tab. 10.7 Parametry spotřebičů napojených na rozvaděč PR2

Pole rozv.	č.	Spotřebiče	Počet	cos φ [-]	tg φ [-]	η [-]	P _i [kW]	P _{ic} [kW]	P _{elc} [kW]	Q _c [kVAr]	S _c [kVA]
1	1	Osvětlení	Σ	0,95	0,33	0,7	6,2	6,2	8,86	2,91	9,32
2	2	Přímotopné topení	Σ	1	0,00	0,95	36,5	17,5	18,42	0,00	18,42
3	3	Pohony – výsypka	4	0,8	0,75	0,75	0,75	3	4,00	3,00	5,00
	4	Odsávání zvonů	8	0,82	0,70	0,82	2,2	17,6	21,46	14,98	26,17
4	5	Kalolifer	1	1	0,00	0,74	1,1	1,1	1,49	0,00	1,49
	6	Hlavní ventilátory	4	0,82	0,70	0,86	7,5	30	34,88	24,35	42,54
	7	Odstředivky	3	0,8	0,75	0,78	0,75	2,25	2,88	2,16	3,61
	8	Topení odstředivek	1	1	0,00	0,95	7,6	7,6	8,00	0,00	8,00
5	9	Ventilátory	5	0,79	0,78	0,72	0,37	1,85	2,57	1,99	3,25
	10	Usměrňovač č.1	1	0,7	1,02	0,9	15	15	16,67	17,00	23,81
	11	Usměrňovač č.2	1	0,7	1,02	0,9	20	20	22,22	22,67	31,75
	12	Usměrňovač č.3	1	0,7	1,02	0,9	20	20	22,22	22,67	31,75
	13	Usměrňovač č.4	1	0,7	1,02	0,9	20	20	22,22	22,67	31,75
6	14	Ventilátory	2	0,85	0,62	0,85	4	8	9,41	5,83	11,07
	15	Kalolifer	2	1	0,00	0,74	0,75	1,5	2,03	0,00	2,03
	16	Odsávání	4	0,8	0,75	0,74	1,1	4,4	5,95	4,46	7,43
7	17	Kompresor	1	0,82	0,70	0,82	2,2	2,2	2,68	1,87	3,27
	18	Míchání lázní	3	0,8	0,75	0,74	1,1	3,3	4,46	3,34	5,57
	19	Pohony bubnů	6	0,8	0,75	0,82	2,2	13,2	16,10	12,07	20,12
8	20	Čerpadla	3	0,8	0,75	0,8	1,5	4,5	5,63	4,22	7,03
	21	Odsávání digestoří	2	0,88	0,54	0,87	7,5	15	17,24	9,31	19,59
	22	Promíchávač	1	0,8	0,75	0,82	2,2	2,2	2,68	2,01	3,35

10.2.1 Výpočet kompenzačního výkonu

Celkový činný příkon

$$P_{R2} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{22} P_{elc_k} = 181,01 \text{ kW}$$

Celkový jalový příkon

$$Q_{R2} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{22} Q_{c_k} = 127,53 \text{ kVAr}$$

Celkový zdánlivý příkon

$$S_{R2} = \sqrt{P_{R2}^2 + Q_{R2}^2} = \sqrt{181,01^2 + 127,53^2} = 221,42 \text{ kVA}$$

Úroveň znečištění sítě vyššími harmonickými

Na tomto rozvaděči jsou napojeny čtyři usměrňovače, což jsou nelineární zařízení generující vyšší harmonické. Stanovíme úroveň znečištění sítě vyššími harmonickými [7]:

$$z = \frac{S_H}{S_{nT}} \cdot 100 = \frac{150,81}{800} \cdot 100 = 18,85 \%$$

Kde S_H je celkový zdánlivý výkon zařízení generujících harmonické a S_{nT} je zdánlivý výkon napájecího transformátoru podniku. V [7] je uvedeno, že pokud je $z \leq 20 \%$, lze použít nechráněnou kompenzaci.

Proud odebíraný z rozvaděče

$$I_{R2} = \frac{S_{R2}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{221,42}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 319,59 \text{ A}$$

Střední účinník

$$\cos \varphi_{R2} = \frac{P_{R2}}{S_{R2}} = \frac{181,01}{221,42} = 0,817$$

Pomocné hodnoty

$$\text{tg } \varphi_{R2} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{R2})^2}}{\cos \varphi_{R2}} = \frac{\sqrt{1 - 0,817^2}}{0,817} = 0,706$$

$$\text{tg } \varphi_{0,95} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{0,95})^2}}{\cos \varphi_{0,95}} = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} = 0,329$$

Potřebný kompenzační výkon

$$Q_{kom2} = P_{R2}(\operatorname{tg} \varphi_{R2} - \operatorname{tg} \varphi_{0,95}) = 181,01 \cdot (0,706 - 0,329) = 68,24 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 %

$$Q_{kom2_{20\%}} = 1,2 \cdot Q_{kom2} = 1,2 \cdot 68,24 = 81,89 \text{ kVAr}$$

10.2.2 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů

Princip všech výpočtů a výběru komponentů je stejný jako u rozvaděče PR 1, proto zde jsou uvedeny již jen výpočty a vybrané komponenty bez podrobnějšího komentáře.

1) Kompenzační rozvaděč

Potřebný kompenzační výkon na rozvaděči PR 2 je 81,89 kVAr, vybral jsem proto rozvaděč QRN 87,5, který bude mít tyto parametry:

- Instalovaný výkon: 87,5 kVAr
- Skutečný výkon: 77,5 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: 1:2:4:8:8:8
- Základní stupeň: 2,5 kVAr
- Rozměry: 600 x 800 x 315 mm

2) Kondenzátory

Tab. 10.8 Parametry použitých kondenzátorů

Stupeň č.	Váha stupně	Výkon stupně [kVAr]	Typ kondenzátoru	Výkon [kVAr]	Kapacita [μ F]	Jmen. proud [A]
1	1	2,5	CSADG 1-0,4/2,5	2,5	3 x 16,6	3,6
2	2	5	CSADG 1-0,4/5	5	3 x 33,2	7,2
3	4	10	CSADG 1-0,4/10	10	3 x 66,3	14,4
4	8	20	CSADG 1-0,4/20	20	3 x 132,6	28,9
5	8	20	CSADG 1-0,4/20	20	3 x 132,6	28,9
6	8	20	CSADG 1-0,4/20	20	3 x 132,6	28,9

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení**Poměrný podíl rozvaděče**

$$r_2 = \frac{P_{R2}}{P_c} = \frac{181,01}{528,83} = 0,34$$

Minimální činný příkon

$$P_{R2_{min}} = r_2 \cdot P_{c_{min}} = 0,34 \cdot 12 = 4,08 \text{ kW}$$

Minimální jalový výkon

$$Q_{R2_{min}} = P_{R2_{min}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{R2} = 4,08 \cdot 0,706 = 2,88 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{s2_{min}} = Q_{R2_{min}} - Q_{k1.2} = 2,88 - 2,5 = 0,38 \text{ kVAr}$$

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{R2_{min}} = \frac{P_{R2_{min}}}{\sqrt{P_{R2_{min}}^2 + Q_{s2_{min}}^2}} = \frac{4,08}{\sqrt{4,08^2 + 0,38^2}} = 0,996$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je tedy vyhovující.

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení**Celkový činný příkon - viz kap. 10.2.1**

$$P_{R2} = 181,01 \text{ kW}$$

Jalový příkon před kompenzací - viz kap. 10.2.1

$$Q_{R2} = 127,53 \text{ kVAr}$$

Celkový kompenzační výkon

$$Q_{komc} = 2,5 + 5 + 10 + 20 + 20 + 20 = 77,5 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{s2_{max}} = Q_{R2} - Q_{komc} = 127,53 - 77,5 = 50,03 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{R2_{max}} = \frac{P_{R2}}{\sqrt{P_{R2}^2 + Q_{s2_{max}}^2}} = \frac{181,01}{\sqrt{181,01^2 + 50,03^2}} = 0,964$$

Účinník leží v povoleném pásmu 0,95 až 1, použité kompenzační kondenzátory tedy vyhovují i přesto, že jejich skutečný kompenzační výkon je menší než potřebný kompenzační výkon, je to díky rezervě 20 %, se kterou byl potřebný kompenzační výkon výpočtovým způsobem stanoven.

3) Stykače

Tab. 10.9 Vybrané typy stykačů

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	2,5	3,6	K3-18K10 230	18
2	5	7,2	K3-18K10 230	18
3	10	14,4	K3-18K10 230	18
4	20	28,9	K3-32K00 230	35
5	20	28,9	K3-32K00 230	35
6	20	28,9	K3-32K00 230	35

4) Jištění

Tab. 10.10 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	2,5	3,6	PNA000 6A gG	6
2	5	7,2	PNA000 16A gG	16
3	10	14,4	PNA000 25A gG	25
4	20	28,9	PNA000 50A gG	50
5	20	28,9	PNA000 50A gG	50
6	20	28,9	PNA000 50A gG	50

10.2.3 Cenová kalkulace

Tab. 10.11 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Kondenzátor	CSADG 1-0,4/2,5	1	490	490
	CSADG 1-0,4/5	1	610	610
	CSADG 1-0,4/10	1	820	820
	CSADG 1-0,4/20	3	1 300	3 900
Stykač	K3-18K10 230	3	790	2370
	K3-32K00 230	3	1 170	3 510
Pojistka	PNA000 6A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 16A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 25A gG	3	36,96	110,88
	PNA000 50A gG	9	36,96	332,64
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	6	600,13	3 600,78
Hlavní vypínač	LN 200 - I	1	3 351,8	3 351,8
Regulátor	NOVAR 1106	1	4320	4320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřicí transformátor	CLB 5.91	1	722	722
Komp. rozvaděč	QRN 87,5	1	4 497	4497
Výsledná cena				28 958,2

10.3 Kompenzace na rozvaděči PR 3

Rozvaděč PR 3 má 6 polí, přívod je proveden kabelem CYKY 3B x 95 + 70 mm². Na rozvaděč jsou napojeny elektrická zařízení v budově č. 3 a technologie pro hromadné stříbření malých dílů v bubnech.

Tab. 10.12 Parametry spotřebičů napojených na rozvaděč PR 3

Pole rozv.	č.	Spotřebiče	Počet	cos φ [-]	tg φ [-]	η [-]	P _i [kW]	P _{ic} [kW]	P _{elc} [kW]	Q _c [kVAr]	S _c [kVA]
1	1	Osvětlení	Σ	0,95	0,33	0,70	4,25	4,25	6,07	2,00	6,39
2	2	Topná tělesa	3	1,00	0,00	0,95	1,45	4,35	4,58	0,00	4,58
	3	Odstředivky	3	0,80	0,75	0,78	1,50	4,50	5,77	4,33	7,21
	4	Odsávání	5	0,82	0,70	0,83	2,22	11,10	13,37	9,33	16,31
3	5	Velká odstředivka	1	0,85	0,62	0,84	4,00	4,00	4,76	2,95	5,60
	6	Topení odstředivky	1	1,00	0,00	0,95	2,00	2,00	2,11	0,00	2,11
	7	Odsávání	3	0,80	0,75	0,74	1,10	3,30	4,46	3,34	5,57
	8	Čerpadla	8	0,82	0,70	0,74	1,10	8,80	11,89	8,30	14,50
	9	Pohony ZAP	4	0,80	0,75	0,72	0,75	3,00	4,17	3,13	5,21
4	10	Zvedání zvonů	8	0,78	0,80	0,70	0,50	4,00	5,71	4,58	7,33
	11	Pohony bubnů	8	0,80	0,75	0,82	2,20	17,60	21,46	16,10	26,83
	12	Čerpadla	4	0,80	0,75	0,75	0,75	3,00	4,00	3,00	5,00
	13	Míchání lázní	4	0,80	0,75	0,75	1,10	4,40	5,87	4,40	7,33
5	14	Omílací bubny	4	0,82	0,70	0,77	1,50	6,00	7,79	5,44	9,50
	15	Olejová čerpadla	5	0,80	0,75	0,80	2,20	11,00	13,75	10,31	17,19
	16	Zdvihání bubnů	4	0,80	0,75	0,75	1,10	4,40	5,87	4,40	7,33
6	17	Manipulátory	10	0,75	0,88	0,70	0,55	5,50	7,86	6,93	10,48
	18	Pohon výsypka	2	0,82	0,70	0,78	1,50	3,00	3,85	2,68	4,69
	19	Hlavní ventilátory	6	0,82	0,70	0,86	7,50	45,00	52,33	36,52	63,81

10.3.1 Výpočet kompenzačního výkonu

Celkový činný příkon

$$P_{R3} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{19} P_{elc_k} = 139,25 \text{ kW}$$

Celkový jalový příkon

$$Q_{R3} = \beta \cdot \sum_{k=1}^{19} Q_{c_k} = 95,81 \text{ kVAr}$$

Celkový zdánlivý příkon

$$S_{R3} = \sqrt{P_{R3}^2 + Q_{R3}^2} = \sqrt{139,25^2 + 95,81^2} = 169,02 \text{ kVA}$$

Proud odebíraný z rozvaděče

$$I_{R3} = \frac{S_{R3}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{169,02}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 243,96 \text{ A}$$

Střední účinník

$$\cos \varphi_{R3} = \frac{P_{R3}}{S_{R3}} = \frac{139,25}{169,02} = 0,824$$

Pomocné hodnoty

$$\operatorname{tg} \varphi_{R3} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{R3})^2}}{\cos \varphi_{R3}} = \frac{\sqrt{1 - 0,824^2}}{0,824} = 0,688$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{0,95} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{0,95})^2}}{\cos \varphi_{0,95}} = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} = 0,329$$

Potřebný kompenzační výkon

$$Q_{kom3} = P_{R3} (\operatorname{tg} \varphi_{R3} - \operatorname{tg} \varphi_{0,95}) = 139,25 \cdot (0,688 - 0,329) = 49,99 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 %

$$Q_{kom3_20\%} = 1,2 \cdot Q_{kom3} = 1,2 \cdot 49,99 = 59,99 \text{ kVAr}$$

10.3.2 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů**1) Kompenzační rozvaděč**

Potřebný kompenzační výkon na rozvaděči PR 3 je 59,99 kVAr, vybral jsem tedy rozvaděč QRN 70:

- Instalovaný výkon: 70 kVAr
- Skutečný výkon: 58,5 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: 1:2:4:8:8:8
- Základní stupeň: 1,5 kVAr
- Rozměry: 600 x 700 x 315 mm

2) Kondenzátory

Tab. 10.13 Parametry použitých kondenzátorů

Stupeň č.	Váha stupně	Výkon stupně [kVAr]	Typ kondenzátoru	Výkon [kVAr]	Kapacita [μ F]	Jmen. proud [A]
1	1	1,5	CSADG 1-0,4/1,5	1,5	3 x 9,9	2,2
2	2	4	CSADG 1-0,4/4	4	3 x 26,5	5,8
3	4	8	CSADG 1-0,4/8	8	3 x 53,1	11,5
4	8	15	CSADG 1-0,4/15	15	3 x 99,5	21,7
5	8	15	CSADG 1-0,4/15	15	3 x 99,5	21,7
6	8	15	CSADG 1-0,4/15	15	3 x 99,5	21,7

Pozn.:

Výkony kondenzátorů zde nejsou přesné násobky předchozího stupně podle váhy, jak je obvyklé. Kondenzátory jsem takto zvolil, aby byl účinník v předepsaných mezích při minimálním i maximálním zatížení rozvaděče, výběr je také omezen na hodnoty kondenzátorů, které výrobce nabízí.

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení

Poměrný podíl rozvaděče

$$r_3 = \frac{P_{R3}}{P_c} = \frac{139,25}{528,83} = 0,26$$

Minimální činný příkon

$$P_{R3_{min}} = r_3 \cdot P_{c_{min}} = 0,26 \cdot 12 = 3,12 \text{ kW}$$

Minimální jalový příkon

$$Q_{R3_{min}} = P_{R3_{min}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{R3} = 3,12 \cdot 0,688 = 2,15 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{s3_{min}} = Q_{R3_{min}} - Q_{k1.3} = 2,15 - 1,5 = 0,65 \text{ kVAr}$$

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{R3_{min}} = \frac{P_{R3_{min}}}{\sqrt{P_{R3_{min}}^2 + Q_{s3_{min}}^2}} = \frac{3,12}{\sqrt{3,12^2 + 0,65^2}} = 0,979$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je tedy vyhovující.

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení

Celkový činný příkon - viz kap. 10.3.1

$$P_{R3} = 139,25 \text{ kW}$$

Jalový příkon před kompenzací - viz kap. 10.3.1

$$Q_{R3} = 95,81 \text{ kVAr}$$

Celkový kompenzační výkon

$$Q_{komc} = 1,5 + 4 + 8 + 15 + 15 + 15 = 58,5 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{s3max} = Q_{R3} - Q_{komc} = 95,81 - 58,5 = 37,31 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{R3max} = \frac{P_{R3}}{\sqrt{P_{R3}^2 + Q_{s3max}^2}} = \frac{139,25}{\sqrt{139,25^2 + 37,31^2}} = 0,966$$

Účinník leží v povoleném pásmu, navržené kompenzační kondenzátory tedy vyhovují.

3) Stykače

Tab. 10.14 Vybrané stykače

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	1,5	2,2	K3-18K10 230	18
2	4	5,8	K3-18K10 230	18
3	8	11,5	K3-18K10 230	18
4	15	21,7	K3-24K00 230	28
5	15	21,7	K3-24K00 230	28
6	15	21,7	K3-24K00 230	28

4) Jištění

Tab. 10.15 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	1,5	2,2	PNA000 6A gG	6
2	4	5,8	PNA000 10A gG	10
3	8	11,5	PNA000 20A gG	20
4	15	21,7	PNA000 40A gG	40
5	15	21,7	PNA000 40A gG	40
6	15	21,7	PNA000 40A gG	40

10.3.3 Cenová kalkulace

Tab. 10.16 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Kondenzátor	CSADG 1-0,4/1,5	1	470	470
	CSADG 1-0,4/4	1	580	580
	CSADG 1-0,4/8	1	760	760
	CSADG 1-0,4/15	3	1 030	3 090
Stykač	K3-18K10 230	3	790	2370
	K3-24K00 230	3	870	2610
Pojistka	PNA000 6A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 10A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 20A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 40A gG	9	36,96	332,64
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	6	600,13	3600,78
Hlavní vypínač	LN 160 - I	1	2598	2598
Regulátor	NOVAR 1106	1	4 320	4 320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřicí transformátor	CLB 5.91	1	722	722
Komp. rozvaděč	QRS 70	1	3 982	3 982
Výsledná cena				25 871,92

11 Návrh skupinové hrazené kompenzace

Vycházím z potřebného kompenzačního výkonu, který jsem vypočetl pro jednotlivé rozvaděče dříve v kap. 10. Dále je nutné stanovit činitel zatlumení. Kmitočet HDO v distribuční síti, do které je podnik připojen, je 216 $\frac{2}{3}$ Hz. Z tohoto důvodu volím činitel zatlumení $p = 7\%$, rezonanční frekvence vzniklého LC článku bude pak 189 Hz, tato hodnota je dostatečně vzdálena od kmitočtu HDO i od frekvencí vyšších harmonických. Kromě toho, je menší činitel zatlumení výhodnější, protože vychází menší indukčnost hradící tlumivky a tím pádem její menší rozměry a cena.

11.1 Hrazená kompenzace na rozvaděči PR 1

Pro tento rozvaděč jsem opět provedl výběr všech komponentů s vysvětlením postupu výběru. Pro rozvaděče PR 2 a PR 3 již nebude výběr komponentů vysvětlován, ale budou uvedeny jen vybrané komponenty.

11.1.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů

1) Hrazený kompenzační rozvaděč

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 % je 92,35 kVAr. Z katalogu firmy ZEZ – Silko jsem proto zvolil hrazený rozvaděč QRF 110:

- Instalovaný výkon: 110 kVAr
- Kompenzační výkon: 86,1 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: 1:2:4:8:8:8
- Základní stupeň: 2,8 kVAr
- Rozměry: 800 x 2090 x 650 mm

2) Kondenzátory

Vlivem zařazené tlumivky vzroste napětí na kondenzátoru nad hodnotu napětí sítě 400 V, konkrétní hodnota závisí na hodnotě činitele zatlumení p a určíme jí ze vztahu:

$$U_{c7\%} = \frac{U_N}{1-p} = \frac{400}{1-0,07} = 430,11 \text{ V}$$

Je zřejmé, že nelze použít kondenzátory na jmenovité napětí 400 V jako u nehrazené kompenzace. Vybíráme proto z kondenzátorů, které mají jmenovité napětí 440 V. Kondenzátory pro toto napětí jsou standardně vyráběny právě pro spojení s tlumivkou a pro činitel ztlumení $p = 7\%$. Z katalogu ZEZ – Silko [16] jsem vybral tyto kondenzátory:

Tab. 11.1 Vybrané kondenzátory

stupeň č.	Typ kondenzátoru	Instalovaný výkon [kVAr]	skutečný výkon [kVA]	kapacita [μ F]	jmen. proud [A]
1	CSADG 1-0,44/3,15	3,15	2,8	3 x 17,3	4,04
2	CSADG 1-0,44/6,25	6,25	5,6	3 x 34,3	8,02
3	CSADG 1-0,44/12,5	12,5	11,1	3 x 68,5	16
4	CSADG 1-0,44/25	25	22,2	3 x 137	32,1
5	CSADG 1-0,44/25	25	22,2	3 x 137	32,1
6	CSADG 1-0,44/25	25	22,2	3 x 137	32,1

Pozn.:

Skutečný výkon kompenzačních kondenzátorů je hodnota, která platí pro spojení s příslušnou tlumivkou, která je ke každému kondenzátoru v katalogu přiřazena. Tento výkon je tedy nižší než instalovaný právě vlivem zařazené tlumivky a také proto, že kondenzátory jsou provozovány na nižším napětí, než je jejich jmenovité napětí.

3) Hradící tlumivky

Tlumivky je možno v katalogu výrobců vybrat podle výkonu kondenzátoru, ke kterému mají být připojeny, přesto však ověříme potřebnou indukčnost tlumivky ještě výpočtem. Tlumivky jsem vybíral z katalogu ZEZ – Silko [16].

Výpočet tlumivky pro 1. stupeň – 3,15 kVAr

Reaktance kondenzátoru

$$X_{C1} = \frac{U_{CN}^2}{Q_{c1}} = \frac{440^2}{3,15 \cdot 10^3} = 61,46 \Omega$$

Reaktance tlumivky

$$X_{L1} = p \cdot X_{C1} = 0,07 \cdot 61,46 = 4,3 \Omega$$

Indukčnost tlumivky

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{2\pi \cdot f} = \frac{4,3}{2\pi \cdot 50} = 13,69 \text{ mH}$$

V katalogu je pro kondenzátor 3,15 kVAr uvedená hodnota tlumivky 13,694 mH. Tato hodnota se od vypočtené hodnoty liší jen minimálně, takže tlumivky pro ostatní stupně jsem vybral přímo z katalogu, výpočet zde již není třeba.

Nyní ještě výpočtem ověříme skutečnou hodnotu kompenzačního výkonu udanou pro spojení dané tlumivky a kondenzátoru v katalogu. Výpočet je proveden opět pro stupeň 3,15 kVAr a vychází z výše vypočtených hodnot.

Výsledná reaktance LC článku

$$X_{LC1} = (1 - p) \cdot X_{C1} = (1 - 0,07) \cdot 61,46 = 57,16 \Omega$$

Skutečný kompenzační výkon

$$Q_{LC1} = \frac{U_N^2}{X_{LC1}} = \frac{400^2}{57,16} = 2,8 \text{ kVAr}$$

Z výpočtu vidíme, že hodnota skutečného kompenzačního výkonu kondenzátoru udaná v katalogu a hodnota získané výpočtem se po zaokrouhlení na jedno desetinné místo shoduje. Vybrané tlumivky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 11.2 Vybrané tlumivky

Stupeň č.	Typ tlumivky	Indukčnost tlumivky [mH]	Skutečný výkon stupně [kVAr]
1	ZEZ-CuK 03,15-189/400/440	13,694	2,8
2	ZEZ-CuK 06,25-189/400/440	6,902	5,6
3	ZEZ-CuK 12,5-189/400/440	3,455	11,1
4	ZEZ-CuK 25-189/400/440	1,727	22,2
5	ZEZ-CuK 25-189/400/440	1,727	22,2
6	ZEZ-CuK 25-189/400/440	1,727	22,2

Stejně jako u nehrazené kompenzace provedeme i zde kontrolu, zda účinník bude při minimálním a maximálním odběru závodu v povolených mezích.

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení

Výpočet vychází z hodnot vypočtených v kapitole 10.1.3, proto zde již část výpočtu, která je stejná, nebude opakována. Bude dosazeno pouze do vztahů, kde se výsledky liší.

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{s1_{min}} = Q_{R1_{min}} - Q_{k1.1} = 3,3 - 2,8 = 0,5 \text{ kVAR}$$

Kde $Q_{k1.1}$ je výkon nejmenšího kompenzačního stupně.

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{R1_{min}} = \frac{P_{R1_{min}}}{\sqrt{P_{R1_{min}}^2 + Q_{s1_{min}}^2}} = \frac{4,73}{\sqrt{4,73^2 + 0,5^2}} = 0,994$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je tedy vyhovující.

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení

Stejně jako u nehrazené kompenzace zde jako maximální zatížení uvažujeme dříve vypočtené zatížení. Princip výpočtu a hodnoty celkového činného příkonu P_{R1} a jalového příkonu před kompenzací Q_{R1} jsou zde stejné jako u kap. 10.1.3, takže je uvedena opět pouze část výpočtu která se liší.

Celkový kompenzační výkon

Je to součet kompenzačních výkonů pro jednotlivé stupně, které jsou uvedeny v tab. 11.2.

$$Q_{komc} = 2,8 + 5,6 + 11,1 + 22,2 + 22,2 + 22,2 = 86,1 \text{ kVAR}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{s1_{max}} = Q_{R1} - Q_{komc} = 145,35 - 86,1 = 58,25 \text{ kVAR}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{R1_{max}} = \frac{P_{R1}}{\sqrt{P_{R1}^2 + Q_{s1_{max}}^2}} = \frac{208,57}{\sqrt{208,57^2 + 58,25^2}} = 0,963$$

Účinník leží v povoleném pásmu 0,95 až 1, takže kondenzátor pro nejmenší stupeň vyhovuje.

4) Stykače

Při výběru stykače, který je proveden opět z katalogu firmy ZEZ – Silko [16], se řídíme jmenovitým napětím, pro které je stykač určen. Dále vybíráme podle proudu, který má stykač spínat. Vybrané stykače jsou vybaveny zabudovanými předstihovými kontakty a tlumícími rezistory, aby se omezily špičky zapínacího proudu.

Tab. 11.3 Vybrané stykače

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	2,8	4,04	K3-18K10 230	18
2	5,6	8,02	K3-18K10 230	18
3	11,1	16	K3-32K10 230	35
4	22,2	32,1	K3-50K00 230	48
5	22,2	32,1	K3-50K00 230	48
6	22,2	32,1	K3-50K00 230	48

5) Jištění

Pojistky budou umístěny v třípólovém pojistkovém odpínači typu FH000-3A/T do 160 A, který je určen pro nožové pojistky velikosti 000. Tento odpínač byl opět vybrán z katalogu firmy OEZ [20].

Tab. 11.4 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	2,8	4,04	PNA000 6A gG	6
2	5,6	8,02	PNA000 10A gG	10
3	11,1	16	PNA000 25A gG	25
4	22,2	32,1	PNA000 50A gG	50
5	22,2	32,1	PNA000 50A gG	50
6	22,2	32,1	PNA000 50A gG	50

6) Regulátor

Regulátor je zde vybrán stejným principem jako u nehrazené kompenzace. Vybrán regulátor NOVAR 1106, jištěný jističem PL 7. Měřicí transformátor proudu je typu CLB 5.91.

11.1.2 Cenová kalkulace

Tab. 11.5 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Kondenzátor	CSADG 1-0,44/3,15	1	510	510
	CSADG 1-0,44/6,25	1	640	640
	CSADG 1-0,44/12,5	1	880	880
	CSADG 1-0,44/25	3	1360	4 080
Tlumivky	ZEZ-CuK 03,15-189/400/440	1	1560	1 560
	ZEZ-CuK 06,25-189/400/440	1	1740	1 740
	ZEZ-CuK12,5-189/400/440	1	2160	2 160
	ZEZ-CuK 25-189/400/440	3	2920	8 760
Stykač	K3-18K10 230	2	790	1 580
	K3-32K10 230	1	1170	1 170
	K3-50K10 230	3	1650	4 950
Pojistka	PNA 000 6A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 10A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 25A gG	3	36,96	110,88
	PNA 000 50A gG	9	36,96	332,64
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	6	600,13	3 600,78
Hlavní vypínač	LN 250 - I	1	3 515	3 515
Regulátor	NOVAR 1106	1	4320	4320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřicí tr.	CLB 5.91	1	722	722
Komp. rozvaděč	QRF 110	1	12 250	12 250
Výsledná cena				51 554,4

11.2 Hrazená kompenzace na rozvaděči PR 2

11.2.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů

1) Hrazený kompenzační rozvaděč

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 % je 81,89 kVAr. V katalogu firmy ZEZ – Silko, jsem vybral typ QRF 90.

- Instalovaný výkon: 90 kVAr
- Kompenzační výkon: 86,7 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: 1:2:4:8:8:16
- Základní stupeň: 2,2 kVAr
- Rozměry: 800 x 2090 x 650 mm

2) Kondenzátory

Tab. 11.6 Vybrané kondenzátory

Stupeň č.	Typ kondenzátoru	Instalovaný výkon [kVAr]	Skutečný výkon [kVA]	Kapacita [μ F]	Jmen. proud [A]
1	CSADG 1-0,44/2,5	2,5	2,2	3 x 13,7	3,21
2	CSADG 1-0,44/5	5	4,4	3 x 27,4	6,41
3	CSADG 1-0,44/10	10	8,9	3 x 54,8	12,8
4	CSADG 1-0,44/20	20	17,8	3 x 109,6	25,6
5	CSADG 1-0,44/20	20	17,8	3 x 109,6	25,6
6	CSADG 1-0,44/40	40	35,6	3 x 219,2	51,3

3) Hradící tlumivky

Tab. 11.7 Vybrané tlumivky

Stupeň č.	Typ tlumivky	Indukčnost tlumivky [mH]	Skutečný výkon stupně [kVAr]
1	ZEZ-CuK 02,5-189/400/440	17,252	2,2
2	ZEZ-CuK 05-189/400/440	8,627	4,4
3	ZEZ-CuK 10-189/400/440	4,319	8,9
4	ZEZ-CuK 20-189/400/440	2,169	17,8
5	ZEZ-CuK 20-189/400/440	2,169	17,8
6	ZEZ-CuK 25-189/400/440	1,535	35,6

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{s2_{min}} = Q_{R2_{min}} - Q_{k1.2} = 2,88 - 2,2 = 0,68 \text{ kVAr}$$

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{R2_{min}} = \frac{P_{R2_{min}}}{\sqrt{P_{R2_{min}}^2 + Q_{s2_{min}}^2}} = \frac{4,08}{\sqrt{4,08^2 + 0,68^2}} = 0,986$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je tedy vyhovující.

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení

Celkový kompenzační výkon

$$Q_{komc} = 2,2 + 4,4 + 8,9 + 17,8 + 17,8 + 35,6 = 86,7 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{s2_{max}} = Q_{R2} - Q_{komc} = 127,53 - 86,7 = 40,83 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{R2_{max}} = \frac{P_{R2}}{\sqrt{P_{R2}^2 + Q_{s2_{max}}^2}} = \frac{181,01}{\sqrt{181,01^2 + 40,83^2}} = 0,975$$

4) Stykače

Tab. 11.8 Vybrané stykače

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	2,2	3,21	K3-18K10 230	18
2	4,4	6,41	K3-18K10 230	18
3	8,9	12,8	K3-18K10 230	18
4	17,8	25,6	K3-32K00 230	35
5	17,8	25,6	K3-32K00 230	35
6	35,6	51,3	K3-62K00 230	72

5) Jištění

Tab. 11.9 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	2,2	3,21	PNA000 6A gG	6
2	4,4	6,41	PNA000 10A gG	10
3	8,9	12,8	PNA000 20A gG	20
4	17,8	25,6	PNA000 40A gG	40
5	17,8	25,6	PNA000 40A gG	40
6	35,6	51,3	PNA000 80A gG	80

Pojistky budou umístěny v třípólových pojistkových odpínačích typu FH000-3A/T.

11.2.2 Cenová kalkulace

Tab. 11.10 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus [Kč]	Cena celkem [Kč]
Kondenzátor	CSADG 1-0,44/2,5	1	460	460
	CSADG 1-0,44/5	1	580	580
	CSADG 1-0,44/10	1	810	810
	CSADG 1-0,44/20	2	1190	2 380
	CSADG 1-0,44/40	1	2150	2 150
Tlumivky	ZEZ-CuK 02,5-189/400/440	1	1530	1 530
	ZEZ-CuK 05-189/400/440	1	1710	1 710
	ZEZ-CuK10-189/400/440	1	1935	1 935
	ZEZ-CuK 20-189/400/440	2	2730	5 460
	ZEZ-CuK 25-189/400/440	1	2920	2 920
Stykač	K3-18K10 230	3	790	2 370
	K3-32K10 230	2	1170	2 340
	K3-62K10 230	1	1960	1 960
Pojistka	PNA 000 6A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 10A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 20A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 40A gG	6	36,96	221,76
	PNA 000 80A gG	3	36,96	110,88
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	6	600,13	3 600,78
Hlavní vypínač	LN3-200-I	1	3 351,8	3 351,8
Regulátor	NOVAR 1106	1	4 320	4 320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřicí transformátor	CLB 5.91	1	722	722
Komp. rozvaděč	QRF 90	1	10 315	10 315
Výsledná cena				49 683,72

11.3 Hrazená kompenzace na rozvaděči PR 3

11.3.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů

1) Hrazený kompenzační rozvaděč

Zde je potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 % 59,99 kVAr. Zvolil jsem kompenzační rozvaděč QRF 60.

- Instalovaný výkon: 60 kVAr
- Kompenzační výkon: 59,6 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: přibližně 1:2:4:4:8:8
- Základní stupeň: 1,8 kVAr
- Rozměry: 800 x 2090 x 650 mm

2) Kondenzátory

Tab. 11.11 Vybrané kondenzátory

Stupeň č.	Typ kondenzátoru	Instalovaný výkon [kVAr]	Skutečný výkon [kVA]	Kapacita [μ F]	Jmen. proud [A]
1	CSADG 1-0,44/2	2	1,8	3 x 11	2,6
2	CSADG 1-0,44/5	5	4,4	3 x 27,4	6,41
3	CSADG 1-0,44/10	10	8,9	3 x 54,8	12,8
4	CSADG 1-0,44/10	10	8,9	3 x 54,8	12,8
5	CSADG 1-0,44/20	20	17,8	3 x 109,6	25,6
6	CSADG 1-0,44/20	20	17,8	3 x 109,6	25,6

3) Hradící tlumivky

Tab. 11.12 Vybrané tlumivky

Stupeň č.	Typ tlumivky	Indukčnost tlumivky [mH]	Skutečný výkon stupně [kVAr]
1	ZEZ-CuK 02-189/400/440	17,252	1,8
2	ZEZ-CuK 05-189/400/440	8,627	4,4
3	ZEZ-CuK 10-189/400/440	4,319	8,9
4	ZEZ-CuK 10-189/400/440	4,319	8,9
5	ZEZ-CuK 20-189/400/440	2,169	17,8
6	ZEZ-CuK 20-189/400/440	2,169	17,8

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{s3_{min}} = Q_{R3_{min}} - Q_{k1.3} = 2,15 - 1,8 = 0,35 \text{ kVAr}$$

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{R3_{min}} = \frac{P_{R3_{min}}}{\sqrt{P_{R3_{min}}^2 + Q_{s3_{min}}^2}} = \frac{3,12}{\sqrt{3,12^2 + 0,35^2}} = 0,994$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je vyhovující.

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení

Celkový kompenzační výkon

$$Q_{komc} = 1,8 + 4,4 + 8,9 + 8,9 + 17,8 + 17,8 = 59,6 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{s3_{max}} = Q_{R3} - Q_{komc} = 95,81 - 59,6 = 36,21 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{R3_{max}} = \frac{P_{R3}}{\sqrt{P_{R3}^2 + Q_{s3_{max}}^2}} = \frac{139,25}{\sqrt{139,25^2 + 36,21^2}} = 0,968$$

4) Stykače

Tab. 11.13 Vybrané stykače

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	2	2,6	K3-18K10 230	18
2	4,4	6,41	K3-18K10 230	18
3	8,9	12,8	K3-18K10 230	18
4	8,9	12,8	K3-18K00 230	18
5	17,8	25,6	K3-32K00 230	35
6	17,8	25,6	K3-32K00 230	35

5) Jištění

Tab. 11.14 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	2	2,6	PNA000 6A gG	6
2	4,4	6,41	PNA000 10A gG	10
3	8,9	12,8	PNA000 20A gG	20
4	8,9	12,8	PNA000 20A gG	20
5	17,8	25,6	PNA000 40A gG	40
6	17,8	25,6	PNA000 40A gG	40

Pojistky budou umístěny v třípólových pojistkových odpínačích typu FH000-3A/T.

11.3.2 Cenová kalkulace

Tab. 11.15 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus [Kč]	Cena celkem [Kč]
Kondenzátor	CSADG 1-0,44/2	1	460	460
	CSADG 1-0,44/5	1	580	580
	CSADG 1-0,44/10	2	810	1 620
	CSADG 1-0,44/20	2	1 190	2 380
Tlumivky	ZEZ-CuK 02-189/400/440	1	1 530	1 530
	ZEZ-CuK 05-189/400/440	1	1 710	1 710
	ZEZ-CuK10-189/400/440	2	1 935	3 870
	ZEZ-CuK 20-189/400/440	2	2 730	5 460
Stykač	K3-18K10 230	4	790	3 160
	K3-32K10 230	2	1 170	2 340
Pojistka	PNA 000 6A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 10A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 20A gG	6	37,8	226,8
	PNA 000 40A gG	6	36,96	221,76
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	6	600,13	3 600,78
Hlavní vypínač	LN3-160-I	1	2598	2598
Regulátor	NOVAR 1106	1	4 320	4 320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřicí transformátor	CLB 5.91	1	722	722
Komp. rozvaděč	QRF 60	1	5 290	5 290
Výsledná cena [Kč]				40 412,44

12 Porovnání hrazené a nehrazené skupinové kompenzace, výpočet ztrát

Zde jsou pro porovnání v souhrnné tabulce uvedeny vypočtené hodnoty pro hrazenou i nehrazenou kompenzaci při maximálním zatížení.

Tab. 12.1 Porovnání vypočtených hodnot pro hrazenou a nehrazenou skupinovou kompenzaci

Typ kompenzace	Nehrazená			Hrazená		
	PR 1	PR 2	PR 3	PR 1	PR 2	PR 3
Rozvaděč						
Činný příkon [kW]	208,57	181,01	139,25	208,57	181,01	139,25
Komp. výkon vypočtený [kVAr]	92,35	81,89	59,99	92,35	81,89	59,99
Komp. výkon instalovaný [kVAr]	97,5	77,5	58,5	86,1	86,7	59,6
Jalový příkon před komp. [kVAr]	145,35	127,53	95,81	145,35	127,53	95,81
Jalový příkon po komp. [kVAr]	47,85	50,03	37,31	59,25	40,83	36,21
Zdánlivý příkon před komp. [kVA]	254,22	221,42	169,02	254,22	221,42	169,02
Zdánlivý příkon po komp. [kVA]	213,98	187,8	144,16	216,82	185,56	143,88
Celkový proud před komp. [A]	366,93	319,59	243,96	366,93	319,59	243,96
Celkový proud po komp. [A]	308,85	271,07	208,07	312,96	267,83	207,67
Účinnost před komp. [-]	0,82	0,817	0,824	0,82	0,817	0,824
Účinnost po komp. [-]	0,975	0,964	0,966	0,963	0,975	0,968

Výpočet činných ztrát

Vycházel jsem z celkového množství odebrané energie za jeden měsíc (1.1 – 31.1 2013), které je $A_m = 126\,892$ kWh. Z tohoto údaje jsem určil celkový příkon:

$$P_c = \frac{A_m}{T_m} = \frac{126\,892}{16 \cdot 20} = 396,54 \text{ kW}$$

Kde T_m je doba v hodinách, po kterou je podnik každý měsíc v provozu. V podniku je dvousměnný provoz, takže uvažujeme $2 \times 8 = 16$ hodin každý den. Předpokládal jsem, že každý měsíc má průměrně 20 pracovních dní.

Hodnota P_c je celkový příkon závodu, do výpočtu ztrát však potřebujeme znát příkony pro jednotlivé rozvaděče. Proto je nutné celkový příkon získaný na základě odebraného množství energie přibližně rozdělit mezi jednotlivé rozvaděče. Zjistil jsem poměrný podíl pp_x rozvaděčů na základě hodnot z tab. 12.1.

$$pp_x = \frac{P_{\check{c}x}}{P_{\check{c}1} + P_{\check{c}2} + P_{\check{c}3}}$$

Kde $P_{\check{c}x}$ je činný příkon na rozvaděči x určený výpočtem, přičemž x je číslo rozvaděče, tj. 1,2 nebo 3.

Skutečný příkon pro jednotlivé rozvaděče P_x pak určíme z celkového příkonu P_c a z poměrného podílu pp_x :

$$P_x = P_c \cdot pp_x$$

Jako ukázkou postupu výpočtu jsem provedl výpočet ztrát při použití nehrazené kompenzace pro kabel, který napájí rozvaděč PR 1. Postup výpočtu pro další kabely a hrazenou kompenzaci je stejný, takže výpočty zde nejsou rozepsány a výsledky jsou již jen shrnuty v tabulce.

Výpočet ztrát na kabelu rozvaděče PR 1

Rozvaděč je připojen dvěma kabely CYKY 3 x 70 + 35 mm² délky 35 m. Činný odpor jednoho kabelu je dle tabulek 0,269 Ω/km. Protože máme dva paralelní kabely, hodnota činného odporu bude poloviční.

Poměrný podíl rozvaděče PR 1

$$pp_1 = \frac{P_{\check{c}1}}{P_{\check{c}1} + P_{\check{c}2} + P_{\check{c}3}} = \frac{208,57}{208,57 + 181,01 + 139,25} = 0,394$$

Skutečný příkon

$$P_1 = P_c \cdot pp_1 = 396,54 \cdot 0,394 = 159,24 \text{ kW}$$

Proud přívodním kabelem před kompenzací

$$I_{R1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_{stř}} = \frac{156,24}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,84} = 268,46 \text{ A}$$

Jako $\cos \varphi_{stř}$ je u všech rozvaděčů brán střední účinník zjištěný měřením.

Proud přívodním kabelem po kompenzaci

$$I_{R1k} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_{1k}} = \frac{156,24}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,975} = 231,29 \text{ A}$$

$\cos \varphi_{1k}$ je hodnota účinníku po kompenzaci získaná výpočtem a uvedená v tab. 12.1. Pro každý rozvaděč je tato hodnota jiná.

Ztráty před kompenzací

$$\Delta P_1 = 3 \cdot \frac{R_{k1}}{2} \cdot I_{R1}^2 \cdot l = 3 \cdot \frac{0,269}{2} \cdot 268,46^2 \cdot 0,035 = 1017,82 \text{ W}$$

Ztráty po kompenzaci

$$\Delta P_{1k} = 3 \cdot \frac{R_{k1}}{2} \cdot I_{R1k}^2 \cdot l = 3 \cdot \frac{0,269}{2} \cdot 321,29^2 \cdot 0,035 = 755,48 \text{ W}$$

Ušetřené ztráty

$$\Delta P_{u1} = \Delta P_1 - \Delta P_{1k} = 1017,82 - 755,48 = 262,34 \text{ W}$$

Ušetřená energie za měsíc

$$A_{1m} = \Delta P_{u1} \cdot T_m = 262,34 \cdot 16 \cdot 20 = 83,95 \text{ kWh}$$

Ušetřené náklady za měsíc

$$N_{1m} = C \cdot \Delta A_{1m} = 1,852 \cdot 83,95 = 155,48 \text{ Kč}$$

Kde C je účtovaná cena elektřiny za 1 kWh.

Ušetřená energie za rok

$$A_{1r} = \Delta P_{u1} \cdot T_r = 262,34 \cdot 16 \cdot 20 \cdot 12 = 1007,41 \text{ kWh}$$

Ušetřené náklady za rok

$$N_{1r} = C \cdot \Delta A_{1r} = 1,852 \cdot 1007,41 = 1\,865,72 \text{ Kč}$$

Výsledky pro všechny rozvaděče, resp. kabely jsou v následující tabulce. Celkové ušetřené náklady za měsíc resp. rok byly získány součtem ušetřených nákladů za měsíc, resp. rok u jednotlivých rozvaděčů. Zaokrouhlení je provedeno na koruny.

Tab. 12.2 Porovnání vypočtených ztrát pro hrazenou a nehrazenou skupinovou kompenzaci

Kompenzace	Nehrazená			Hrazená		
	PR 1	PR 2	PR 3	PR 1	PR 2	PR 3
Použitý kabel ¹⁾	I	II	III	I	II	III
Odpor kabelu [Ω /km]	0,1345	0,188	0,198	0,1345	0,188	0,198
Délka [km]	0,035	0,045	0,02	0,035	0,045	0,02
Proud před komp. [A]	268,46	233,03	179,20	268,46	233,03	179,20
Proud po komp. [A]	231,29	203,05	155,83	234,17	200,76	155,50
Ztráty před komp. [W]	1017,82	1378,20	381,50	1017,82	1378,20	381,50
Ztráty po komp. [W]	755,48	1046,45	288,47	774,42	1022,97	287,28
Ušetřené ztráty [W]	262,35	331,75	93,03	243,40	355,23	94,22
Ušetřená energie/měsíc [kWh]	83,95	106,16	29,77	77,89	113,67	30,15
Ušetřené náklady/měsíc [Kč]	155,48	196,61	55,13	144,25	210,53	55,84
Ušetřená energie/rok [kWh]	1007,41	1273,94	357,24	934,66	1364,10	361,81
Ušetřené náklady/rok [Kč]	1865,72	2359,33	661,61	1730,98	2526,31	670,08
Celkové ušetřené náklady/měsíc [Kč]	407			410		
Celkové ušetřené náklady/rok [Kč]	4 886			4 927		

¹⁾ Použité typy kabelů k napájení rozvaděčů jsou tyto:

I 2 x CYKY 3B x 70 + 35 mm² (dva paralelní kabely)

II 2 x CYKY 3B x 50 + 25 mm² (dva paralelní kabely)

III CYKY 3B x 95 + 50 mm²

13 Návrh centrální nehrazené kompenzace

Tuto kompenzaci navrhuji opět na nízkém napětí, ale pro celý závod, bude tedy v jednom kompenzačním rozvaděči, který bude ve vstupní rozvodně. Kompenzační rozvaděč bude připojen k hlavnímu rozvaděči HR, přehledové schéma viz příloha č. 5. Velikost potřebného kompenzačního výkonu lze stanovit opět několika způsoby, zde je použit způsob, kdy sečteme činné a jalové příkony pro jednotlivé rozvaděče a způsobem, jako u jednotlivých rozvaděčů stanovíme kompenzační výkon.

Protože kompenzujeme závod jako celek, uvažujeme zde menší součinitel soudobosti než u skupinové kompenzace, já jsem zvolil součinitel náročnosti $\beta = 0,6$. Rezervu kompenzačního výkonu uvažujeme opět 20 %.

13.1 Výpočet kompenzačního výkonu

Činný příkon na jednotlivých rozvaděčích

Stanovíme ho jako součet činných příkonů všech spotřebičů v tabulkách. Tabulky jsou uvedeny v příslušných kapitolách u jednotlivých rozvaděčů.

$$P_{R1c} = \sum_{k=1}^{15} P_{elc_k} = 278,09 \text{ kW}$$

$$P_{R2c} = \sum_{k=1}^{22} P_{elc_k} = 241,34 \text{ kW}$$

$$P_{R3c} = \sum_{k=1}^{19} P_{elc_k} = 185,66 \text{ kW}$$

Činný příkon celého závodu

Je to součet činných příkonů na jednotlivých rozvaděčích, vynásobený součinitelem soudobosti $\beta = 0,6$.

$$P_c = \beta \cdot (P_{R1c} + P_{R2c} + P_{R3c}) = 0,6 \cdot (278,09 + 241,34 + 185,66) = 423,05 \text{ kW}$$

Jalový příkon na jednotlivých rozvaděčích

Stanovíme ho jako součet jalových příkonů všech spotřebičů v tabulkách.

$$Q_{R1c} = \sum_{k=1}^{15} Q_{elc_k} = 193,08 \text{ kVAr}$$

$$Q_{R2c} = \sum_{k=1}^{22} Q_{elc_k} = 170,05 \text{ kVAr}$$

$$Q_{R3c} = \sum_{k=1}^{19} Q_{elc_k} = 127,75 \text{ kVAr}$$

Jalový příkon celého závodu

$$Q_c = \beta \cdot (Q_{R1c} + Q_{R2c} + Q_{R3c}) = 0,6 \cdot (193,08 + 170,05 + 127,75) = 294,53 \text{ kVAr}$$

Zdánlivý příkon celého závodu

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} = \sqrt{423,05^2 + 294,53^2} = 515,48 \text{ kVA}$$

Proud odebíraný celým závodem

$$I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{515,48}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 744,03 \text{ A}$$

Střední účinník

$$\cos \varphi_c = \frac{P_c}{S_c} = \frac{423,05}{515,48} = 0,821$$

Pomocné hodnoty

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_c)^2}}{\cos \varphi_c} = \frac{\sqrt{1 - 0,821^2}}{0,821} = 0,695$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{0,95} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_{0,95})^2}}{\cos \varphi_{0,95}} = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} = 0,329$$

Potřebný kompenzační výkon

$$Q_{komc} = P_c (\operatorname{tg} \varphi_c - \operatorname{tg} \varphi_{0,95}) = 423,05 \cdot (0,695 - 0,329) = 154,84 \text{ kVAr}$$

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 %

$$Q_{komc_20\%} = 1,2 \cdot Q_{kom} = 1,2 \cdot 154,84 = 185,81 \text{ kVAr}$$

13.2 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů

Princip volby komponentů je stejný jako pro skupinové kompenzace, proto zde jsou uvedeny již jen vybrané komponenty. Komponenty jsem vybíral ze stejných katalogů jako u skupinové kompenzace, rozněž ceny jsou brány ze stejných zdrojů.

1) Kompenzační rozvaděč

Potřebný kompenzační výkon pro centrální kompenzaci je 185,81 kVAr, vybral jsem proto rozvaděč QRV 220:

- Instalovaný výkon: 220 kVAr
- Skutečný výkon: 195 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: 1:2:4:8:8:16
- Základní stupeň: 5 kVAr
- Rozměry: 800 x 2090 x 650 mm

2) Kondenzátory

Tab. 13.1 Vybrané kondenzátory

Stupeň č.	Váha stupně	Výkon stupně [kVAr]	Typ kondenzátoru	Výkon [kVAr]	Kapacita [μ F]	Jmen. proud [A]
1	1	5	CSADG 1-0,4/5	5	3 x 32,2	7,2
2	2	10	CSADG 1-0,4/10	10	3 x 66,3	14,4
3	4	20	CSADG 1-0,4/20	20	3 x 132,6	28,9
4	8	40	CSADG 1-0,4/40	40	3 x 265,3	57,7
5	8	40	CSADG 1-0,4/40	40	3 x 265,3	57,7
6	16	80	2 x CSADG 1-0,4/40	2 x 40	2 x 3 x 132,6	2 x 57,7

Pro stupeň č. 6 jsou použity dva kondenzátory, každý o výkonu 40 kVAr, protože výrobce nenabízí kondenzátor s výkonem 80 kVAr.

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení

Minimální činný výkon celého závodu

$$P_{C_{min}} = 12 \text{ kW}$$

minimální jalový příkon

$$Q_{c_{min}} = P_{c_{min}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 12 \cdot 0,695 = 8,34 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{s_{min}} = Q_{c_{min}} - Q_{k1.c} = 8,34 - 5 = 3,34 \text{ kVAr}$$

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{c_{min}} = \frac{P_{c_{min}}}{\sqrt{P_{c_{min}}^2 + Q_{s_{min}}^2}} = \frac{12}{\sqrt{12^2 + 3,34^2}} = 0,963$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je tedy vyhovující.

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení

Celkový činný příkon - viz kap. 13.1

$$P_c = 423,05 \text{ kW}$$

Jalový příkon před kompenzací - viz kap. 13.1

$$Q_c = 294,53 \text{ kVAr}$$

Celkový kompenzační výkon

$$Q_{komc} = 5 + 10 + 20 + 40 + 40 + 80 = 195 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{s_{max}} = Q_c - Q_{komc} = 294,53 - 195 = 99,53 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{c_{max}} = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + Q_{s_{max}}^2}} = \frac{423,05}{\sqrt{423,05^2 + 99,53^2}} = 0,973$$

3) Stykače

Tab. 13.2 Vybrané stykače

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	5	7,2	K3-18K10 230	18
2	10	14,4	K3-18K10 230	18
3	20	28,9	K3-24K10 230	28
4	40	57,7	K3-62K00 230	72
5	40	57,7	K3-62K00 230	72
6	80	115,4	K3-115K00 230	144

4) Jištění

Tab. 13.3 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon kondenzátoru [kVAr]	Proud kondenzátoru [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	5	7,2	PNA000 16A gG	16
2	10	14,4	PNA000 25A gG	25
3	20	28,9	PNA000 50A gG	50
4	40	57,7	PNA000 100A gG	100
5	40	57,7	PNA000 100A gG	100
6	80	115,4	PNA1 200A gG	200

Nožové pojistky pro stupeň 1 až 5 budou umístěny v třípólových pojistkových odpínačích typu FH000-3A/T, tento odpínač je pro pojistky velikosti 000 do 160 A a je vybrán z katalogu firmy OEZ [20]. Pro stupeň č. 6 budou použity pojistky 200 A, bylo proto třeba vybrat jiný typ pojistkového odpínače. Zvolil jsem typ FH1-3A/F, jedná se o pojistkový odpínač určený pro nožové pojistky velikosti 1 do 250 A. Vybrán z katalogu OEZ [23].

5) Regulátor

NOVAR 1106 se šesti výstupy. Jištění jističem PL 7 6A/B, měření proudu je provedeno přes měřicí transformátor typu CLA 3.2 s primárním proudem 1000 A, sekundární proud je 5 A.

13.3 Cenová kalkulace

Tab. 13.4 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Kondenzátor	CSADG 1-0,4/5	1	610	610
	CSADG 1-0,4/10	1	820	820
	CSADG 1-0,4/20	1	1 300	1 300
	CSADG 1-0,4/40	4	2 320	9 280
Stykač	K3-18K10 230	2	790	1 580
	K3-24K00 230	1	870	870
	K3-62K00 230	2	1 960	3 920
	K3-115K00 230	1	2 422	2 422
Pojistka	PNA000 16A gG	3	37,8	113,4
	PNA000 25A gG	3	36,96	110,88
	PNA000 50A gG	3	36,96	110,88
	PNA000 100A gG	6	39,48	236,88
	PNA1 200A gG	3	89,04	267,12
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	5	600,13	3000,65
Pojistkový odpínač	FH1-3A/F	1	2 050,44	2 050,44
Hlavní vypínač	LN3-400-I	1	6 738	6 738
Regulátor	NOVAR 1106	1	4 320	4 320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřicí transformátor	CLA 3.2	1	901	901
Komp. rozvaděč	QRV 220	1	10 446	10 446
Výsledná cena				49 193,55

14 Návrh centrální hrazené kompenzace

Při návrhu vycházím z potřebného kompenzačního výkonu, který je pro centrální kompenzaci 185,81 kVAr, výpočet viz kap. 13.1. Pro volbu činitele zatlumení platí totéž, co bylo napsáno v úvodu kap. 11, proto je zvolen činitel zatlumení opět $p = 7 \%$. Rovněž výběr kompenzačních komponentů je proveden stejným principem jako v kap. 11.

14.1 Volba kompenzačního rozvaděče a komponentů

1) Hrazený kompenzační rozvaděč

Potřebný kompenzační výkon s rezervou 20 % je 185,81 kVAr. Z katalogu firmy ZEZ – Silko [16] jsem proto zvolil hrazený rozvaděč QRF 220. Rozdíl mezi instalovaným a skutečným výkonem vysvětlený v kap. 10.3.1 má platnost i zde.

- Instalovaný výkon: 220 kVAr
- Skutečný výkon: 178,8 kVAr
- Počet stupňů: 6
- Váha stupňů: 1:2:5:8:8:8
- Základní stupeň: 5 kVAr
- Rozměry: 800 x 2090 x 650 mm

2) Kondenzátory

Tab. 14.1 Vybrané kondenzátory

Stupeň č.	Typ kondenzátoru	Instalovaný výkon [kVAr]	Skutečný výkon [kVA]	Kapacita [μ F]	Jmen. proud [A]
1	CSADG 1-0,44/6,25	6,25	5,6	3 x 34,3	8,2
2	CSADG 1-0,44/15	15	13,3	3 x 82,2	19,7
3	CSADG 1-0,44/30	30	26,7	3 x 164,4	39,4
4	CSADG 1-0,44/50	50	44,4	3 x 274	65,6
5	CSADG 1-0,44/50	50	44,4	3 x 274	65,6
6	CSADG 1-0,44/50	50	44,4	3 x 274	65,6

3) Hradící tlumivky

Tab. 14.2 Vybrané tlumivky

Stupeň č.	Typ tlumivky	Indukčnost tlumivky [mH]	Skutečný výkon stupně [kVAr]
1	ZEZ-CuK 06,25-189/400/440	6,902	5,6
2	ZEZ-CuK 15-189/400/440	2,875	13,3
3	ZEZ-AI 30-189/400/440	1,438	26,7
4	ZEZ-AI 50-189/400/440	0,864	44,4
5	ZEZ-AI 50-189/400/440	0,864	44,4
6	ZEZ-AI 50-189/400/440	0,864	44,4

Provedeme opět kontrolu, zda účinník bude při minimálním a maximálním odběru závodu v povolených mezích.

a) Kontrola účinníku pro minimální zatížení

Minimální činný příkon

$$P_{c_{min}} = 12 \text{ kW}$$

Minimální jalový výkon

$$Q_{c_{min}} = P_{c_{min}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 12 \cdot 0,695 = 8,34 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon dodávaný ze sítě

$$Q_{s_{min}} = Q_{c_{min}} - Q_{k1.c} = 8,34 - 5,6 = 2,74 \text{ kVAr}$$

Hodnota účinníku při minimálním zatížení

$$\cos \varphi_{c_{min}} = \frac{P_{c_{min}}}{\sqrt{P_{c_{min}}^2 + Q_{s_{min}}^2}} = \frac{12}{\sqrt{12^2 + 2,74^2}} = 0,975$$

Účinník při minimálním zatížení leží v pásmu 0,95 až 1. Kompenzační kondenzátor pro nejmenší stupeň je tedy vyhovující

b) Kontrola účinníku při maximálním zatížení

Celkový činný příkon - viz kap. 13.1

$$P_c = 423,05 \text{ kW}$$

Jalový příkon před kompenzací - viz kap. 13.1

$$Q_c = 294,53 \text{ kVAr}$$

Celkový kompenzační výkon

$$Q_{komc} = 5,6 + 13,3 + 26,7 + 44,4 + 44,4 + 44,4 = 178,8 \text{ kVAr}$$

Jalový výkon, který bude dodáván ze sítě

$$Q_{smax} = Q_c - Q_{komc} = 294,53 - 178,8 = 115,73 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci

$$\cos \varphi_{cmax} = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + Q_{smax}^2}} = \frac{423,05}{\sqrt{423,05^2 + 115,73^2}} = 0,965$$

Účinník leží v povoleném pásmu 0,95 až 1, použité kompenzační kondenzátory tedy vyhovují.

3) Stykače

Stykače jsou opět vybrány tak, aby jejich jmenovitý proud byl větší než proud příslušného kompenzačního stupně. Výběr je proveden z katalogu [16] firmy ZEZ – Silko.

Tab. 14.3 Vybrané stykače

Stupeň	Výkon stupně [kVAr]	Proud stupně [A]	Vybraný stykač	Jmen. proud stykače [A]
1	5,6	8,2	K3-18K10 230	18
2	13,3	19,7	K3-24K10 230	28
3	26,7	39,4	K3-50K10 230	48
4	44,4	65,6	K3-74K00 230	87
5	44,4	65,6	K3-74K00 230	87
6	44,4	65,6	K3-74K00 230	87

4) Jištění

Tab. 14.4 Vybrané pojistky

Stupeň	Výkon stupně [kVAR]	Proud stupně [A]	Vybraná pojistka	Jmen. proud pojistky [A]
1	5,6	8,2	PNA 000 10A gG	10
2	13,3	19,7	PNA 000 32A gG	32
3	26,7	39,4	PNA 000 63A gG	63
4	44,4	65,6	PNA 000 100A gG	100
5	44,4	65,6	PNA 000 100A gG	100
6	44,4	65,6	PNA 000 100A gG	100

Nožové pojistky pro všechny stupně budou umístěny v třípólových pojistkových odpínačích typu FH000-3A/T, tento odpínač je vybrán z katalogu firmy OEZ [20].

5) Regulátor

NOVAR 1106 se šesti výstupy. Jištěný jističem PL 7 6A/B, měření proudu je provedeno přes měřicí transformátor typu CLA 3.2 s primárním proudem 1000 A, sekundární proud je 5 A.

14.2 Cenová kalkulace

Tab. 14.5 Vybrané komponenty a kalkulace ceny

Položka	Typ	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Kondenzátor	CSADG 1-0,44/6,25	1	640	640
	CSADG 1-0,44/15	1	1 010	1 010
	CSADG 1-0,44/30	1	1 860	1 860
	CSADG 1-0,44/50	3	2 950	8 850
Tlumivka	ZEZ-CuK 06,25-189/400/440	1	1 740	1 740
	ZEZ-CuK 15-189/400/440	1	2 590	2 590
	ZEZ-Al 30-189/400/440	1	3 850	3 850
	ZEZ-Al 50-189/400/440	3	4 570	13 710
Stykač	K3-18K10 230	1	790	790
	K3-24K10 230	1	870	870
	K3-50K10 230	1	1 650	1 650
	K3-74K00 230	3	2 422	7 266
Pojistka	PNA 000 10A gG	3	37,8	113,4
	PNA 000 32A gG	3	36,96	110,88
	PNA 000 63A gG	3	36,96	110,88
	PNA 000 100A gG	9	39,48	355,32
Pojistkový odpínač	FH000-3A/T	6	600,13	3 600,78
Hlavní vypínač	LN3-400-I	1	6 738	6 738
Regulátor	NOVAR 1106	1	4 320	4 320
Jistič pro regulátor	PL7	1	96,3	96,3
Měřicí transformátor	CLA 3.2	1	901	901
Komp. rozvaděč	QRF 220	1	14 176	14 176
Výsledná cena				75 348,56

15 Porovnání hrazené a nehrazené centrální kompenzace

Zde jsou podobným způsobem jako u skupinové kompenzace uvedeny pro porovnání v tabulce vypočtené hodnoty pro centrální hrazenou a nehrazenou kompenzaci, hodnoty platí pro maximální odběr celého závodu.

Tab. 15.1 Vypočtené hodnoty pro hrazenou a nehrazenou centrální kompenzaci

Typ centrální kompenzace	Nehrazená	Hrazená
Činný příkon celého závodu [kW]	423,05	423,05
Kompenzační výkon vypočtený [kVAr]	185,81	185,81
Kompenzační výkon instalovaný [kVAr]	195	178,8
Jalový příkon před komp. [kVAr]	294,53	294,53
Jalový příkon po komp. [kVAr]	99,53	115,73
Zdánlivý příkon před komp. [kVA]	515,48	515,48
Zdánlivý příkon po komp. [kVA]	434,6	438,59
Celkový proud před komp. [A]	744,03	744,03
Celkový proud po komp. [A]	627,29	633,05
Účinnost před komp. [-]	0,821	0,821
Účinnost po komp. [-]	0,973	0,965

Je vidět, že lepší účinnost po kompenzaci je dosažen u nehrazené varianty kompenzace. Je to proto, že je zde větší instalovaný kompenzační výkon. U hrazené kompenzace je dokonce instalovaný kompenzační výkon menší než teoreticky stanovený potřebný kompenzační výkon. Tato skutečnost však neznamená, že je návrh proveden špatně, protože jak bylo výpočtem v kap. (14.1) dokázáno, tak i při maximálním zatížení je účinnost v povoleném pásmu 0,95 až 1.

16 Celkové ekonomické zhodnocení

Nejprve jsou v následující tabulce pro přehlednost shrnuty náklady na pořízení všech navržených variant kompenzace. Tyto ceny nezahrnují náklady na montáž zařízení a uvedení do provozu. Výsledná cena celé skupinové kompenzace byla stanovena jako součet cen dílčích skupinových kompenzací pro jednotlivé rozvaděče, všechny ceny jsou zaokrouhleny na koruny a jsou bez DPH.

Tab. 16.1 Ceny všech navržených variant kompenzace

Varianta kompenzace	Skupinová		Centrální	
	Nehrazená	Hrazená	Nehrazená	Hrazená
Cena [Kč]	91 354	141 651	49 194	75 349

Pro určení návratnosti nákladů na jednotlivé varianty navržené kompenzace provedeme výpočet přírážky za nedodržení předepsaného účinníku, tj. stav bez kompenzace. Vycházím přitom z hodnot, které jsem získal z vyúčtování za elektřinu pro období 1.1 – 31.1. 2013. Údaje potřebné pro výpočet přírážky jsou uvedeny v následující tabulce, ceny jsou bez DPH.

Tab. 16.2 Údaje pro výpočet cenové přírážky

Položka	Jednotka	Počet jednotek	Kč/ jednotka	Cena celkem [Kč]
Nejvyšší naměřený čtvrt hodinový výkon	MW	0,531	-	-
Rezervovaná kapacita roční vn	MW	0,230	116 982	26 905,86
Použití sítí vn	MWh	126,892	94,96	12 049,66
Spotřeba činné energie	MWh	126,892	1852	235 003,98
Spotřeba jalové energie	MVArh	81,964	-	-
Účinník ve sledovaném období	-	0,840	-	-

Dále je nutné znát aktuální platný způsob stanovení přírážky dle cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu (ERÚ). Rozhodnutí, podle kterého je výpočet proveden je platné od 1.1. 2013. Je uvedeno v [14] a zní: *Cenová přírážka je stanovena jako součin hodnot nejvyššího naměřeného čtvrt hodinového výkonu za vyhodnocované období, ceny za rezervovanou kapacitu na příslušné napěťové hladině a odpovídající hodnoty přírážky (přírážka v % podle uvedené tabulky dělená 100) a jako součet ceny za použití sítí na příslušné napěťové hladině a ceny za silovou elektřinu, vynásobený odpovídající hodnotou přírážky (přírážka v % podle uvedené tabulky dělená 100) a množstvím elektřiny za vyhodnocované období.*

Cena za silovou elektřinu je dle [14] stanovena na 1588,30 Kč/MWh v místě, kde je provozovatel distribuční soustavy společnost E.ON Distribuce, a. s, což je náš případ.

Tab. 16.3 Platná přírážka za nedodržení účinníku dle cenového rozhodnutí ERÚ [14]

Pásma účinníku	Procentní přírážka za nedodržení účinníku				
	tg φ min	tg φ max	cos φ min	cos φ max	Přírážka
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
1	0	0,328	0,95	1	0
2	0,329	0,484	0,9	0,949	2,85
3	0,485	0,750	0,8	0,899	12,38
4	0,751	1,020	0,7	0,799	28,07
5	1,021	1,333	0,6	0,699	48,58
6	1,334	a více	0	0,599	100,00

Účinník změřený ve sledovaném období byl $\cos \varphi = 0,84$. Tato hodnota spadá dle tabulky 16.3 do pásma účinníku 3, pro které je stanovena procentní přírážka 12,38 %. Výpočet měsíční cenové přírážky dle výše uvedeného postupu je tedy následující:

$$C_p = 0,531 \cdot 116\,982 \cdot 0,1238 + (94,69 + 1588,30) \cdot 0,1238 \cdot 126,892 = 34\,128,62 \text{ Kč}$$

Ceny kompenzačních zařízení pro všechny varianty návrhu jsou v tab. 16.1, pro výpočet návratnosti připočteme ještě cenu za instalaci zařízení C_i , včetně elektroinstalačního materiálu. Tuto cenu odhaduji pro skupinovou kompenzaci na zhruba 12 000 Kč a pro centrální kompenzaci na zhruba 8 000 Kč. Na základě výše vypočtené měsíční cenové přírážky a ceny kompenzačního zařízení včetně instalace, lze pak stanovit návratnost investic do kompenzačního zařízení:

$$N = \frac{C_{zař} + C_i}{C_p}$$

Kde $C_{zař}$ je cena za pořízení kompenzačního zařízení a C_i je cena za instalování a elektroinstalační materiál.

Jako příklad je zde proveden výpočet návratnosti investice N pro centrální nehrazenou kompenzaci:

$$N = \frac{49\,194 + 8000}{34\,128,62} = 1,67 \text{ měsíce}$$

V případě skupinové kompenzace se měsíčně ušetří za snížené ztráty na kabelech k jednotlivým rozvaděčům. U nehrazené kompenzace ušetříme 407 Kč/měsíc a u hrazené 410 Kč/měsíc, viz kap. 12. Příklad výpočtu návratnosti investice je proveden pro skupinovou nehrazenou kompenzací.

$$N = \frac{C_{zař} + C_i}{C_p - N_m} = \frac{91\,354 + 12\,000}{34\,128,62 - 407} = 3,06 \text{ měsíce}$$

Uvedenými způsoby se vypočte i návratnost ostatních variant kompenzace, výsledky jsou proto již jen shrnuty v tabulce.

Tab. 16.4 Návratnost navržených variant kompenzace

Varianta kompenzace	Skupinová		Centrální	
	Nehrazená	Hrazená	Nehrazená	Hrazená
Cena za pořízení [Kč]	91 354	141 651	49 194	75 349
Cena za pořízení včetně instalace [Kč]	103 354	153 651	57 194	83 349
Náklady ušetřené za snížení ztrát [Kč/měsíc]	407	410	-	-
Návratnost [měsíce]	3,06	4,56	1,67	2,44

Jak plyne ze způsobu výpočtu, tak návratnost investice nepřímo závisí na velikosti cenové přírážky, čím bude přírážka vyšší, tím je návratnost do kompenzačního zařízení rychlejší. To prakticky znamená, že čím byl horší účinník a větší množství odebrané energie, tím se kompenzační zařízení rychleji zaplatí.

Je třeba poznamenat, že návratnost stanovená výše uvedeným způsobem je pouze teoretická, protože jsem pro jednoduchost předpokládal, že každý měsíc bude množství odebrané činné a jalové energie stejné nebo hodně podobné, rovněž procentní přírážka pak bude stejná, protože se účinník bude pohybovat stále v pásmu 3 (viz tab. 16.3). Je zde rovněž předpoklad správné a bezporuchové funkce navržené kompenzace po nainstalování, tzn., že účinník bude stále udržován v pásmu 0,95 až 1.

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout kompenzační zařízení pro zmíněný podnik tak, aby se účinník po kompenzaci pohyboval v pásmu 0,95 až 1. Navrhl jsem celkem čtyři varianty kompenzace: skupinovou a centrální v klasické (nehrazené) i hrazené verzi. Klasická a hrazená varianta skupinové kompenzace se liší v instalovaném kompenzačním výkonu o 1,1 kVAr. U centrální kompenzace je rozdíl výkonů klasické a hrazené varianty 16,2 kVAr. Přičemž vyšší instalovaný výkon má vždy klasická kompenzace. Jak ale bylo výpočty dokázáno, tak všechny navržené varianty budou schopny udržet účinník v pásmu 0,95 až 1.

Porovnáme – li z hlediska instalovaného výkonu skupinovou a centrální kompenzací, tak vyšší instalovaný výkon má skupinová kompenzace. Je to z důvodu uvažování rozdílných součinitelů soudobosti β . U skupinové kompenzace uvažuji $\beta = 0,75$ a u centrální $\beta = 0,6$. Je to proto, že celý podnik (všechny provozy dohromady) má vždy menší soudobost než jednotlivé provozy, pro které jsem navrhoval skupinovou kompenzací.

Z celkového ekonomického zhodnocení vychází nejlépe nehrazená centrální kompenzace, která má nejnižší pořizovací cenu a tedy i nejkratší návratnost. Při volbě konkrétní varianty kompenzace však finanční náklady nemohou být rozhodujícím faktorem. Musíme vzít v úvahu také úroveň znečištění sítě vyššími harmonickými, ta je v našem případě 18,85 %, viz kap. 10.2.1. Tato hodnota znečištění je na hraně mezi volbou klasické a hrazené varianty kompenzace, protože od úrovně znečištění vyšší jak 20 % je doporučeno instalovat hrazenou kompenzací. V budoucnu můžeme v podniku předpokládat instalování dalších nelineárních spotřebičů, nejspíše usměrňovačů. V případě instalace nehrazené varianty kompenzace zde vzniká nebezpečí, že bude docházet k odsávání vyšších harmonických kompenzačními kondenzátory, vysvětlení viz kap. 5.2.1. Proto navrhuji instalovat hrazenou kompenzací.

V otázce, zda použít skupinovou nebo centrální kompenzací, je třeba zvážit výhody a nevýhody obou variant. Je zřejmé, že pokud chceme snížit ztráty na rozvodech uvnitř podniku, dáme přednost skupinové kompenzací. V našem případě se použitím skupinové kompenzace sníží ztráty na kabelových vedeních k podružným rozvaděčům PR. Měsíčně se takto celkem ušetří zhruba 410 Kč, jak u hrazené tak nehrazené varianty. Tato částka nemá v našem případě vzhledem k celkové výši platby podniku za el. energii v rozhodování mezi skupinovou a centrální kompenzací velkou váhu.

Z hlediska provozních a udržovacích nákladů je výhodnější centrální kompenzace. Rovněž v otázce poruchovosti se jeví jako lepší varianta centrální kompenzace. Je známo, že

nejporuchovější prvek v kompenzačním rozvaděči je stykač. V našem případě máme u skupinové kompenzace ve všech třech rozvaděčích použito celkem 18 stykačů, zatímco u centrální kompenzace je pouze 6 stykačů, takže se dá předpokládat, že u skupinové kompenzace bude docházet k četnějším poruchám stykačů.

Z výše uvedených důvodů navrhuji investorovi instalovat hrazenou centrální kompenzaci v pořizovací ceně 83 349 Kč bez DPH. Náklady na elektroinstalační materiál a instalaci jsem odhadl na 8000 Kč, jedná se o orientační hodnotu, kterou nelze předem přesně určit, takže dle situace mohou být nakonec tyto náklady spíše vyšší. Teoretická návratnost investice do této varianty je 2,44 měsíce, po uplynutí této doby již budou ušetřené náklady za přírůžku představovat v podstatě zisk.

Závěrem lze tedy říci, že investice na pořízení navržené centrální hrazené kompenzace je zcela opodstatněná. Protože jak bylo ukázáno, tak v případě instalování navrženého kompenzačního zařízení, by podnik jen v námi sledovaném měsíci ušetřil 34 129 Kč za cenovou přírůžku za nedodržení předepsaného účinníku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HÁLA, Pavel a LACINA, Břetislav. *Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů*. Brno, Elektromanagement, 1994, 90s.
- [2] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008, 364 s. ISBN 978- 807-2252-916.
- [3] KORENC, Vladimír a HOLOUBEK, Jiří. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. vyd. Praha: IN - EL, 1999, 127 s. ISBN 80-862-3007-4.
- [4] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 195 s. ISBN 80-708-2976-1.
- [5] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-730-0164-0.
- [6] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [7] KOTĚŠOVEC, Ladislav. *Technické a ekonomické posouzení variant skupinové a centrální kompenzace*. Plzeň, 2012. 146 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [8] ZOUFALÝ, Martin. *Kompenzace jalového výkonu v průmyslovém podniku*. Plzeň, 2010. 89 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [9] URBAN, Vladislav. *Kompenzace jalového výkonu*. Plzeň, 2008. 93 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [10] MAYER, Daniel. *Přenos elektrické energie v neharmonickém ustáleném stavu*. Časopis *EE* 2008, č. 5, str. 32 – 36.
- [11] MOLNÁR, Miloš. *Zlepšení účinníku v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků*. Emcos 2011 [cit. 11. 2. 2012]. Dostupné z: http://www.emcos.cz/pdf/zlepseni_uciniku_MM-2001.pdf
- [12] DOUBEK, Miloš a HANZLÍK Jiří. *Výhody technicky správně řešené kompenzace*. Emcos 2011 [cit. 11. 2. 2012]. Dostupné z: http://www.emcos.cz/pdf/sbornik%20ERU%202006_EMCOS.pdf
- [13] ŽÁČEK, Jaroslav. *Účinník v teorii a praxi*. [cit. 10. 12. 2012]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el120404.pdf>

- [14] *Energetický regulační věstník*. Jihlava 2012. [cit. 7. 5. 2013] Dostupné z: http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV9_2012.pdf
- [15] *Regulátory jalového výkonu NOVAR – návod k obsluze*. [cit. 12. 4. 2013] Dostupné z: http://www.zavodny.cz/data/manualy_novar/Novar1xxx,12xx,1312%20Manual.pdf
- [16] *Katalog kompenzace jalové energie ZEZ – Silko* [online] [10. 4. 2013] Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/customZone/files/pfcnew.pdf>
- [17] *Výkonové vypínače* [online]. *In=160...250A (řada LN2)* [10. 4.2013] Dostupné z: <http://eshop.spelektro.cz/2866-vykonove-vypinace-in160250a-rada-ln2>
- [18] *Nožové pojistky* [online]. [cit. 10. 4. 2013] Dostupné z: http://www.elima.cz/obchod/pojistky-nozove-c-111_649_650.html?page=3&sort=2a
- [19] *Měřicí transformátory* [online]. [12. 4 2013] Dostupné z: http://www.mtbrno.cz/index.php?l=cs&k=produkty&r=p_in&pproud=500
- [20] *Řadové pojistkové odpínače velikosti 000 DO 160 A – katalog OEZ* [10.4. 2013] Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1291-Z01-10_CZ_SK.pdf
- [21] *Pojistkové vložky PNA – katalog OEZ* [11. 4. 2013] Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/4915-Z01-12_CZ_SK.pdf
- [22] *Pojistkový odpínač FH000-3A/T* [online]. [10. 4. 2013] Dostupné z: <http://www.ebshop.cz/kategorie/elektroinstalacni-material/5-jistice/pojistkove-systemy/radove-pojistkove-odpinace/pojistkovy-odpinac-fh000-3a-t.html>
- [23] *Pojistkový odpínač FHI-3A/F* [10. 4. 2013] Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1292-Z01-12_CZ_SK.pdf
- [24] *Ceník komponent pro kompenzaci – EMCOS* [15. 4. 2013] Dostupné z: <http://www.emcos.cz/pdf/Cenik%20komponent%2020120515.pdf>
- [25] *Ceník komponent pro kompenzaci – KOMPEL* [online]. [15. 4. 2013] Dostupné z: <http://www.kompel.cz/prodej-komponent/e-obchod/>
- [26] *FHI-3A/F Pojistkový odpínač 3P 250A* [online]. [10. 4. 2013] Dostupné z: http://www.elima.cz/obchod/3a_f-p-12440.html
- [27] *Návod na montáž, obsluhu a údržbu - regulátor EFR 7* [online]. [cit 22. 3. 2013] Dostupné z: http://www.elima.cz/obchod/3a_f-p-12440.html
- [28] *Kompenzační rozvaděče – katalog EMCOS* [16. 4. 2013] Dostupné z: http://www.emcos.cz/pdf/katkomp_KE-51-011-2012.pdf

Seznam příloh

1.	Tabulka kondenzátorů pro individuální kompenzaci transformátorů.....	133
2.	Tabulka přiřazení pojistek kompenzačním kondenzátorům	134
2.	Přehledové schéma napájení podniku	135
3.	Přehledové schéma skupinové kompenzace.....	136
4.	Přehledové schéma centrální kompenzace	137
6.	Schéma instalace regulátorů NOVAR 1106	138

Přílohy

Tab. 1 Velikosti kompenzačních kondenzátorů pro transformátory různých výkonů [1]

Transformátory 6 - 22/0,4 kV				Transformátory 35/0,4 kV			
Orientované plechy		Neorientované plechy		Orientované plechy		Neorientované plechy	
S_{nt} [kVA]	Q_{kom} [kVAr]	S_{nt} [kVA]	Q_{kom} [kVAr]	S_{nt} [kVA]	Q_{kom} [kVA]	S_{nt} [kVA]	Q_{kom} [kVAr]
100	3	30	3	100	4	100	8
160	4	50	5	160	4	125	10
250	5	75	6	250	6	160	12
400	6	100	7	400	7	200	14
630	8	125	9	630	8	250	17
1000	10	160	10	1000	11	315	21
1600	12	200	12	1600	13	400	26
2500	22	250	15	2500	22	500	32
4000	27	315	18	4000	27	630	38
6300	35	400	22	6300	35	800	47
10000	45	500	27	10000	45	1000	57
		630	32			1250	69
		800	40			1600	88
		1000	50				
		1250	63				
		1600	77				

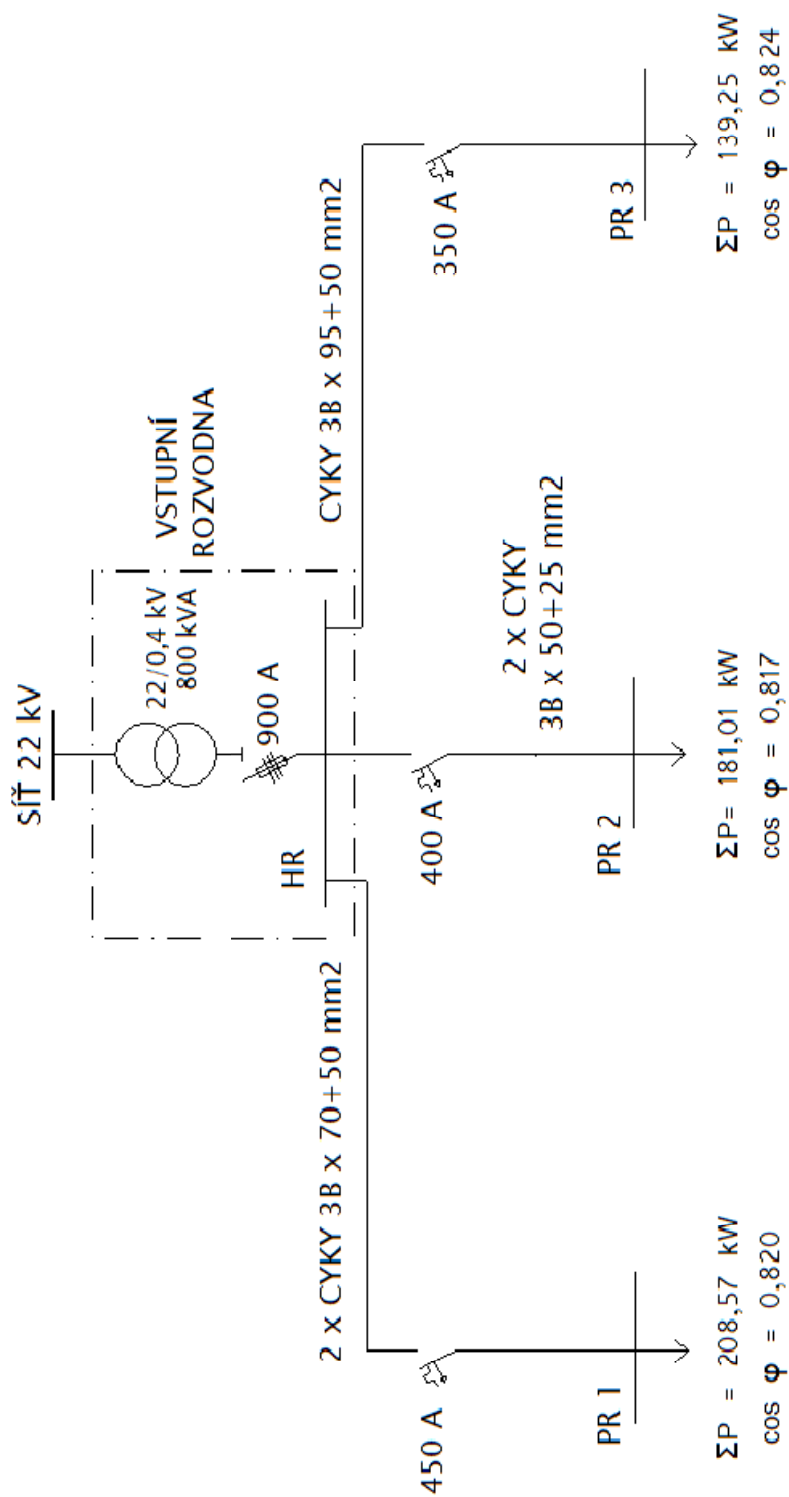
S_{nt} – jmenovitý výkon transformátoru

Q_{kom} – výkon kompenzačního kondenzátoru

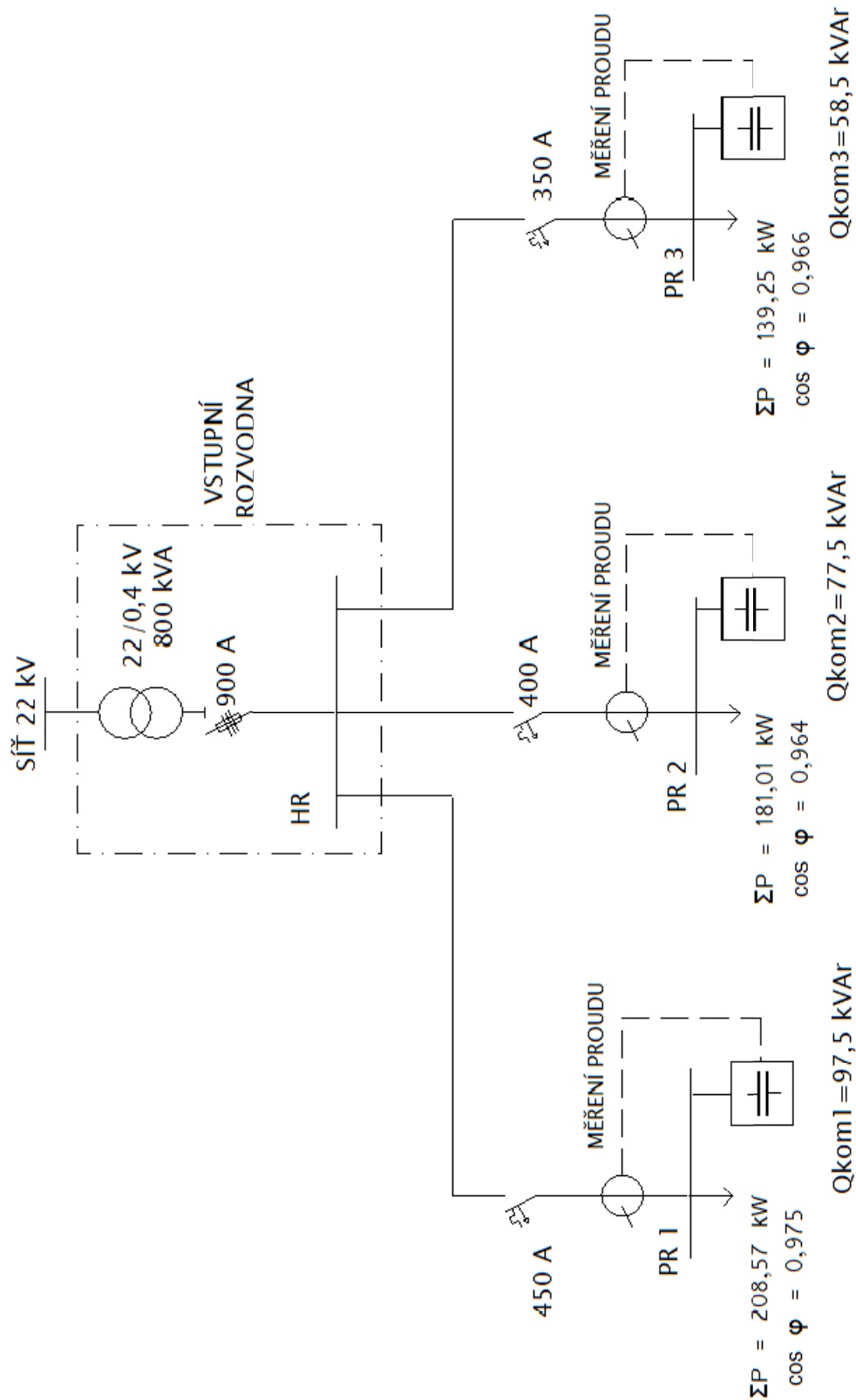
Tab. 2 Přiřazení pojistek kompenzačním kondenzátorům dle [16]

Rated current of three-phase capacitor Jmenovitý proud 3 fázového kondenzátoru	Power rating at 400 V 3 fáz. kompenzační výkon při 400 V	Recommended cross-section of connection bundled Cu conductors Doporučený průřez přípojovacích slaněných Cu vodičů	Fuse rated current Jmenovitý proud pojistky
[A]	[kvar]	[mm ²]	[A]
2,9	2	2,5	8
3,6	2,5	2,5	8
4,5	3,15	2,5	10
5,8	4	2,5	10
7,2	5	2,5	16
9	6,25	2,5	16
11,5	8	4	20
14,4	10	4	25
18,1	12,5	6	32
21,7	15	6	40
28,8	20	10	50
36,1	25	10	63
43,4	30	16	80
50,5	35	16	100
57,7	40	25	100
72,2	50	25	125
86,6	60	35	160
115,5	80	70	200
144,3	100	95	250

PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA – NAPÁJENÍ PODNIKU



PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA – SKUPINOVÁ KOMPENZACE



PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA – CENTRÁLNÍ KOMPENZACE

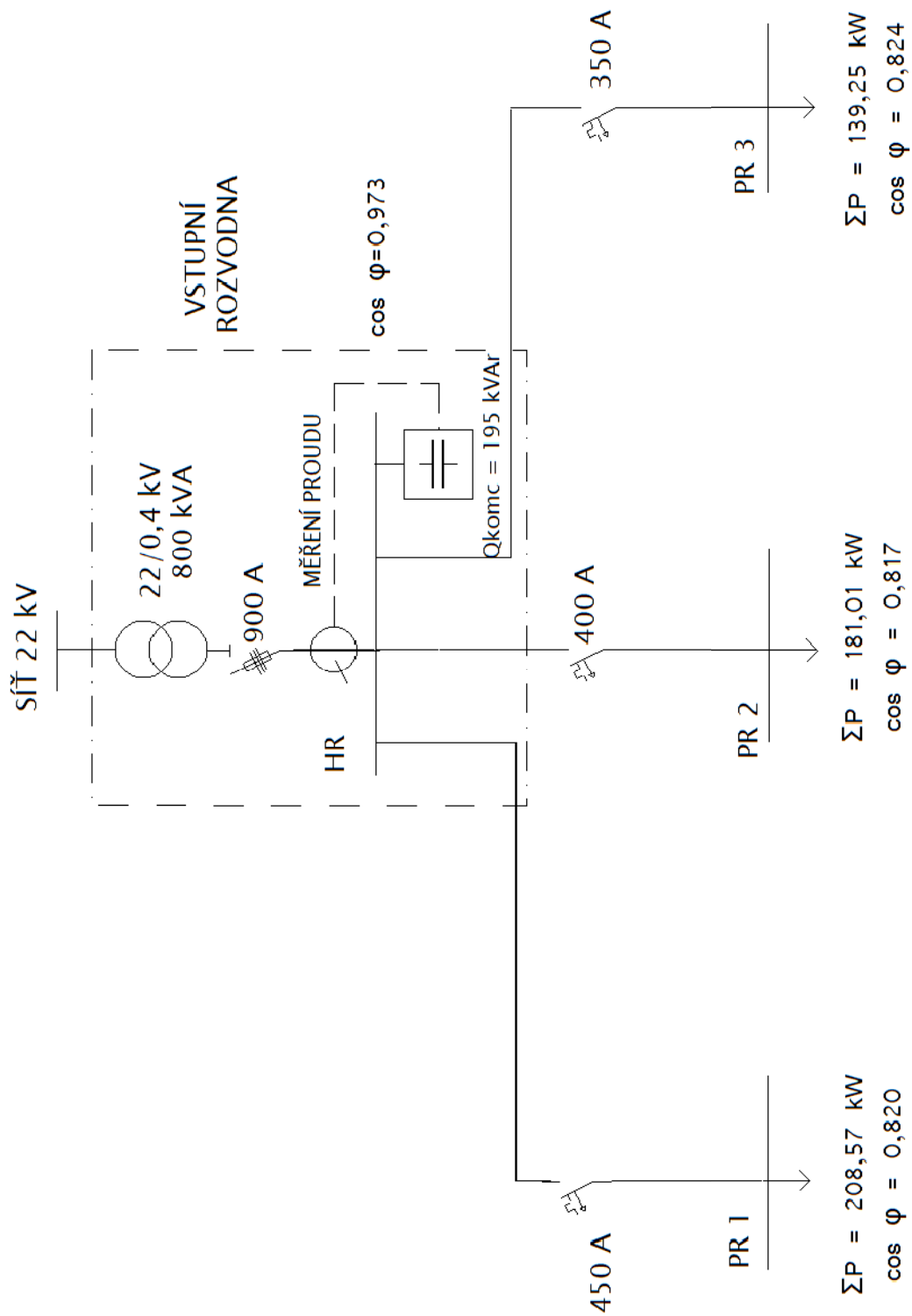


Schéma instalace regulátoru NOVAR 1106 [15]

