

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh kompenzačního rozvaděče**

**vedoucí práce: doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**

**2020**

**autor: Lukáš Košuta**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš KOŠUTA**  
Osobní číslo: **E16B0027K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Návrh kompenzačního rozvaděče**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Zásady pro vypracování

1. Uveďte přínosy kompenzace účinníku a popište druhy kompenzací a srovnajte provozní vlastnosti kompenzačních zařízení.
2. Popište postup volby kompenzačního zařízení a výpočet jeho potřebného kompenzačního výkonu.
3. Zvolte pro konkrétní případ vhodný druh kompenzačního zařízení a navrhnete kompenzační zařízení.



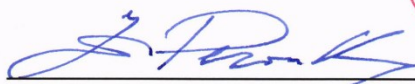
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. KORENC, V., HOLOUBEK, J. Kompenzace jalového výkonu v praxi. IN-EL Praha, 1999.
2. TESAŘOVÁ, M., ŠTROBLOVÁ, M. Průmyslová elektroenergetika. ZČU v Plzni, 2000.
3. HÁLA, P., LACINA, B. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. Brno, Elektromanagement, 1994.
4. Kompenzace jalového výkonu sborník přednášek. Trutnov, Propag Team, 1997.
5. Firemní materiály výrobců a dodavatelů kompenzačních zařízení.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Předkládaná práce se zabývá řešením návrhu kompenzačního zařízení na hladině nízkého napětí. V teoretické části vysvětluje základní pojmy spojené s kompenzací, výhody a důvody proč kompenzační zařízení použít. Jsou zde uvedeny druhy a použití kompenzačních zařízení a jednotlivé použité komponenty jako jsou kondenzátory, tlumivky, stykače, regulátor jalového výkonu. Dále se zabývá postupem volby kompenzačního výkonu. V praktické části je řešen konkrétní návrh kompenzačního zařízení pro průmyslového odběratele na hladině nízkého napětí. Navržené zařízení je konstruováno tak, aby byl dodržen účinník v předepsaných mezích. Součástí návrhu je i výpočet oteplení a ekonomické zhodnocení.

## **Klíčová slova**

jalový výkon, kompenzace účinníku, kondenzátor, tlumivka, regulátor jalového výkonu, centrální kompenzační rozvaděč;

## **Abstract**

This thesis deals with reactive power compensation device on low voltage level (LV). Theoretical part of the work explains basic terms regarding of reactive power compensation, benefits and reasons for the application of power factor correction device. Types and terms the use of compensation devices and individual components like capacitors, reactors, contactors and power factor correction controllers are listed in this thesis. Following part of the work deals with the method for choosing suitable reactive power correction. Specific design of reactive power device for LV industrial customer is described in the practical part. The designed device is constructed in a way that the power factor is within the range of prescribed limits. The design includes the calculation of device heating and further economic evaluation also.

## **Key words**

reactive power, power factor correction, capacitor, reactor, power reactive correction controller, reactive power factor correction equipment;

## **Prohlášení**

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2020

Lukáš Košuta

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí své bakalářské práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které mi při vypracování této práce poskytovala.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ZÁKLADNÍ POJMY</b> .....	<b>13</b>
2.1	SÉRIOVÁ KOMPENZACE ÚČINÍKU .....	14
2.2	PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU .....	15
<b>3</b>	<b>VÝZNAM KOMPENZACE ÚČINÍKU</b> .....	<b>15</b>
3.1	VÝHODY KOMPENZACE .....	16
3.2	NAŘÍZENÍ ERU .....	17
3.3	ZLEPŠENÍ ÚČINÍKU.....	17
<b>4</b>	<b>METODY A ZPŮSOBY KOMPENZACE</b> .....	<b>18</b>
4.1	UMÍSTĚNÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ .....	18
4.1.1	<i>Individuální kompenzace</i> .....	18
4.1.2	<i>Skupinová kompenzace</i> .....	19
4.1.3	<i>Centrální kompenzace</i> .....	19
4.1.4	<i>Kombinovaná kompenzace</i> .....	20
4.2	KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	20
4.2.1	<i>Rotační kompenzační zařízení</i> .....	20
4.2.2	<i>Statické kompenzátory</i> .....	21
4.2.3	<i>Kompenzační kondenzátory</i> .....	22
4.2.4	<i>Prosté kondenzátory</i> .....	22
4.2.5	<i>Kondenzátory s hradíci tlumivkami</i> .....	23
4.3	KOMPENZAČNÍ FILTR.....	24
4.4	ZPŮSOBY ŘÍZENÍ KOMPENZAČNÍHO VÝKONU .....	26
4.4.1	<i>Kompenzátory se stupňovitou regulací</i> .....	26
<b>5</b>	<b>PŘÍSTROJE POUŽITÉ V KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍCH</b> .....	<b>28</b>
5.1	REGULÁTOR JALOVÉHO VÝKONU .....	28
5.2	MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU .....	29
5.3	KONDENZÁTORY .....	30
5.4	TLUMIVKY .....	31
5.4.1	<i>Ochranné tlumivky</i> .....	31
5.4.2	<i>Dekompenzační tlumivky</i> .....	32
5.5	JISTÍCÍ A SPÍNACÍ PŘÍSTROJE .....	32
<b>6</b>	<b>NÁVRH KOMPENZAČNÍHO ROZVADĚČE</b> .....	<b>33</b>
6.1	METODY NÁVRHU KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ .....	33
6.2	VYBRANÝ OBJEKT .....	33
6.3	VÝKONOVÁ BILANCE OBJEKTU.....	34
6.4	NÁVRH.....	34
6.5	ZVOLENÉ VELIKOSTI STUPŇŮ KOMPENZACE .....	40
6.6	JIŠTĚNÍ .....	41
6.7	STYKAČE.....	42
6.8	REGULÁTOR JALOVÉHO VÝKONU .....	42



6.8.1	<i>Nastavení regulátoru</i> .....	43
6.9	VODIČE .....	43
6.10	KONSTRUKCE ROZVADĚČE.....	45
6.11	OTEPLENÍ ROZVADĚČE.....	46
6.12	CENOVÉ ZHODNOCENÍ.....	47
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>49</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>50</b>
	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>

# 1 Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh kompenzačního zařízení na nízké napětí. Text je rozdělen do tří částí. První se zabývá vysvětlením základních pojmů a důvodů proč je nutné kompenzovat. Dále různými druhy kompenzačních zařízení a to jak z pohledu umístění, tak způsobem kompenzace. Práce rozebírá jednotlivé komponenty kompenzačních rozvaděčů, jejichž volba významně ovlivňuje fungování rozvaděče. Druhá část uvádí možnosti návrhu kompenzačního rozvaděče a to jak z pohledu výpočtu, kdy ukazuje možné vypočtení velikosti potřebného kompenzačního výkonu, tak i podle analýzy dané sítě. Třetí část se věnuje samotnému návrhu kompenzačního rozvaděče, který je konstruován jako centrální rozvaděč. Pro návrh byl vybrán průmyslový objekt, kde po dobu tří dnů probíhala analýza sítě. Z analýzy sítě je následně určen potřebný výkon a s přihlédnutím k vyšším harmonickým navrhnutá konstrukce rozvaděče. Následně jsou pro rozvaděč vybrány vhodné komponenty. S nimi je ověřeno oteplení rozvaděče a nakonec spočítána celková cena za rozvaděč.

## Seznam symbolů a zkratek

$P$ .....	činný výkon [W]
$Q$ .....	jalový výkon [VAr]
$1f, 3f$ .....	Počet fází
$S$ .....	zdánlivý výkon [VA]
$\cos \varphi$ .....	účinník
$\lambda$ .....	skutečný účinník
$C$ .....	kapacita [F]
$\omega$ .....	úhlová rychlost [ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$X_C$ .....	reaktance kondenzátoru [ $\Omega$ ]
$f$ .....	frekvence [Hz]
$f_r$ .....	rezonanční frekvence [Hz]
$f_n$ .....	jmenovitá frekvence [Hz]
$f_n$ .....	jmenovitá frekvence [Hz]
NN .....	nízké napětí
VN .....	vysoké napětí
VVN .....	velmi vysoké napětí
$ Z $ .....	impedance [ $\Omega$ ]
$R$ .....	odpor [ $\Omega$ ]
$p$ .....	činitel zatlumení
$U_{Cn}$ .....	jmenovitá hodnota napětí kondenzátoru [V]
$U_{SN}$ .....	jmenovitá hodnota napětí sítě [V]
$X_{LC}$ .....	reaktance LC obvodu [ $\Omega$ ]
$X_L$ .....	reaktance tlumivky [ $\Omega$ ]
$Q_{LC}$ .....	jalový výkon LC obvodu [VAr]
SPD.....	svodič bleskových proudů
$\text{tg } \varphi$ .....	ztrátový činitel
$I_{LC}$ .....	proud LC obvodu [A]
$I_N$ .....	jmenovitá hodnota [A]
THD(i) .....	celkové harmonické zkreslení proudu
THD(u) .....	celkové harmonické zkreslení napětí
$Z_t$ .....	zkratová impedance [ $\Omega$ ]
$I_k''$ .....	rázový zkratový proud [kA]

$I_{ke}$  ..... ekvivalentní oteplovací proud [kA]  
 $S_{min}$  ..... minimální průřez vodiče [mm<sup>2</sup>]  
 $c_0$  ..... měrné teplo [kJ/kg.K]  
 $\vartheta_f$  ..... fiktivní teplota vodiče [°C]  
 $\vartheta_1$  ..... dovolená provozní teplota před zkratem [°C]  
 $\vartheta_k$  ..... maximální dovolená teplota [°C]  
 $\rho_{20}$  ..... měrný odpor při 20°C [ $\mu\Omega m$ ]

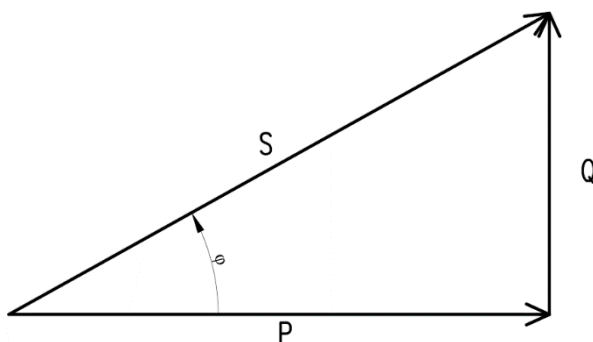
## 2 Základní pojmy

Pro provoz některých zařízení, ať již na straně elektrických sítí nebo spotřebičů elektrické energie, je nutné vytvořit elektromagnetické nebo elektrické pole. To se vytváří buď vinutími (indukčností), nebo elektrodami (kapacitou). Na indukčnosti dochází k fázovému posunu proudu za napětím, na kapacitě se fázově opoždí napětí za proudem. Chování jednotlivých prvků elektrizační soustavy zahrnuje nejen složku činnou (ohmickou), ale i složku jalovou (induktivní nebo kapacitní). Jalovou ji nazýváme z toho důvodu, že energii do této impedance vložená může být užitečně využita pro vytvoření elektrických a magnetických polí, ale posléze je opět vrácena směrem ke zdroji. Při tomto přenosu však vznikají na jednotlivých prvcích přenosových a distribučních sítích ztráty, které jsou ve formě tepla uvolňovány do okolí. V některých případech se jeví jako velmi účelné vkládat do elektrických sítí další zařízení, obvykle kondenzátory, kterými se mění charakter soustavy, a tím se ztráty částečně eliminují. Sériovou kompenzací dochází ke zlepšení napěťových poměrů a paralelní kompenzací zlepšujeme výkonové poměry. [1]

Pro přiblížení problematiky kompenzace jsou zde pro pochopení popsány základní pojmy kompenzace jalového výkonu.

Jalový výkon – výkon, který pouze kmitá mezi zdrojem a spotřebičem. Přesto je důležitý pro magnetické a elektrické pole

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (1)$$



obr. 2-1: trojúhelník výkonů

Činný výkon – v Činný výkon – výkon, který se přenáší od zdroje ke spotřebiči, kde je spotřebováván a přeměněn na jinou formu energie.

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

Zdánlivý výkon – lze vyjádřit jako nejvyšší možný výkon bez fázového posuvu.

$$S = U \cdot I \quad (3)$$

Účinník  $\cos\varphi$  – je určen fázovým posuvem mezi napětím a proudem 1. harmonické.

Vyšší harmonické zvyšují celkový zdánlivý výkon, poté platí vztah.

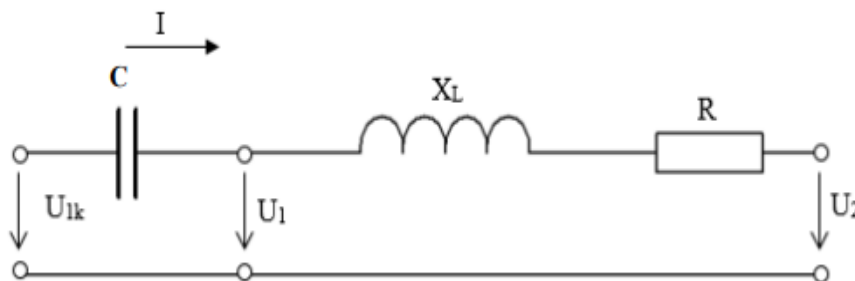
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (4)$$

Deformační účinník  $D$  – představuje vliv harmonických, z čehož vyplývá skutečný účinník  $\lambda$  který v sobě zahrnuje i vlivy vyšších harmonických.

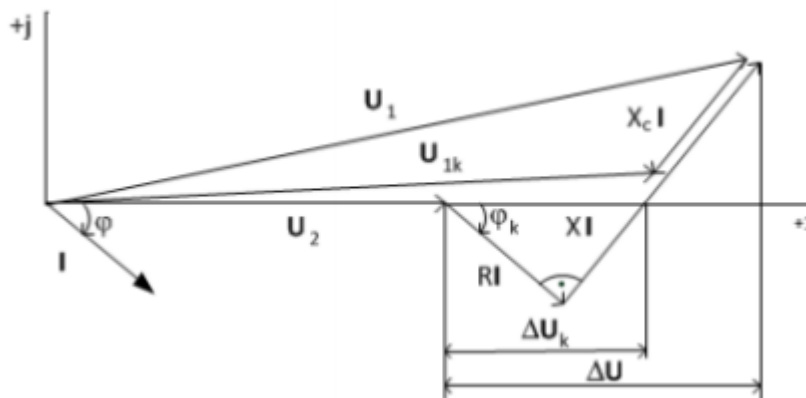
$$\lambda = \frac{P}{Q} \quad (5)$$

## 2.1 Sériová kompenzace účinníku

Soustava se sériovým zapojením kondenzátoru. Jak vyplývá z fázového diagramu, kondenzátor reguluje napětí na spotřebiči. Tento způsob se používá u VVN ke kompenzaci úbytku napětí a ne z důvodu kompenzace jalového výkonu. Z toho důvodu sériové zapojení dále nebude probíráno.



obr. 2-2: náhradní schéma sériové kompenzace [1]

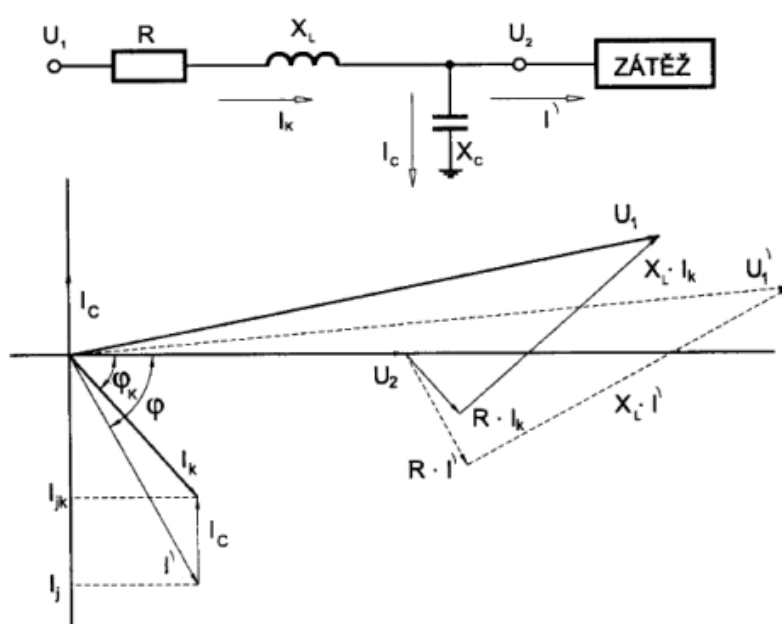


obr. 2-3: fázorový diagram sériové kompenzace [1]

## 2.2 Paralelní kompenzace účinníku

Kompenzační zařízení je připojeno ke spotřebiči paralelně. Ke kompenzaci se používají kondenzátory, synchronní kompenzátory, mezi relativně nová kompenzační zařízení, pak patří aktivní filtry. [3]

Jak je z diagramu na obr. 2-4 vidět, přidáním paralelní kompenzace dojde ke změně fázoru proudu z  $I'$  na proud  $I_k$ . Tím se sníží jalový výkon od zdroje ke kondenzátoru, a proto se sníží i ztráty při přenosu. Snížení ztrát pomocí paralelní kompenzace je jeden ze základních a finančně nejvýhodnějších způsobů snížení nákladů.



obr. 2-4: střídavá síť s paralelní kompenzací [1]

## 3 Význam kompenzace účinníku

Vzhledem k neustále rostoucím cenám energií se dostává stále více do popředí zájmu také kompenzace jalového výkonu. Ochrana klimatu a energie patří k nejvíce diskutovaným otázkám současné politiky. Elektřina, která představuje formu energie s největší bonitou, je přitom ústředním tématem těchto diskusí. Při výrobě elektrické energie se v elektrárnách spalováním uhlí, ropy a plynu uvolňuje především obrovské množství oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), který negativně ovlivňuje klima. Počínaje výrobou elektrické energie z primárních zdrojů až po její spotřebu dochází v jednotlivých procesech ke ztrátám. Přestože z těchto celkových ztrát tvoří zjevně jen malou část proudově závislé

ztráty elektřiny v přenosových a rozvodných sítích provozovatelů a v rozvodných sítích odběratelů, je konečná absolutní hodnota těchto ztrát řádově v miliardách kilowatthodin. Část proudově závislých ztrát v sítích vzniká induktivním jalovým výkonem vznikajícím z provozu běžných spotřebičů. Těmto ztrátám lze zabránit kompenzací.[2]

### 3.1 Výhody kompenzace

Jak již bylo řečeno, kvůli jalovému výkonu charakterizovaného účinníkem je ze sítě odebíraný vyšší proud, z čehož plynou také vyšší ztráty. Těmto ztrátám se snažíme zabránit kompenzačním zařízeními.

Ze zařazení kompenzačního zařízení plyne mnoho výhod. Všechny tyto výhody vedou ke snížení ztrát rozvodné sítě a k zvýšení možné kapacity sítě s přítomným zmenšením ztrát. Výhoda kompenzace se neomezuje pouze na ušetření nákladů a vedení, ale také s kompenzací účinníku jsou spojeny přínosy pro životní prostředí a to z důvodu menší výroby v elektrárnách (tepelné, jaderné) a tím pádem snížení vypouštění CO<sub>2</sub> do ovzduší. Výhody:

- Navržení kompenzovaných rozvodů na nižší průchozí proudy a z toho důvodu nižší pořizovací náklady na vedení.

- Úspora nákladů při investování do nových elektrických zařízení (nizkonapěťový hlavní - rozvod, energetická rozvodná zařízení, průřezy kabelů, aj.).

- Zmenšení úbytků napětí na vedení

- Zmenšení ztrát výkonu na vedení – celkové ztráty na vedení jsou způsobeny oběma složkami proudu. Snížením jalového proudu snížíme i celkový proud a tedy i celkové ztráty na vedení, z čehož vyplývá možnost větší zatížitelnosti vedení.

- Při navržení kompenzace tak, aby byl po vykompenzování účinník v rozmezí hodnot 0,95 až 1 induktivní, dodržíme požadovaný účinník a nebudeme penalizováni za nedodržení účinníku, za což se platí vysoké pokuty. Dle energetického regulačního úřadu (ERU) je za nedodržení účinníku účtován poplatek.



### 3.2 Nařízení ERU

Pokud se  $\cos \varphi$  pohybuje v mezích 0,95 – 1,00, neplatí účastník trhu definovaný v bodě (4.46.) žádnou cenu za nedodržení účinníku. Pokud je vypočtený účinník podle naměřených hodnot menší než 0,95, platí účastník trhu definovaný v bodě (4.46.) provozovateli distribuční soustavy cenu za nedodržení účinníku vycházející z přírážky stanovené podle níže uvedené tabulky. Hodnota  $\text{tg } \varphi$  pro určení přírážky se zaokrouhlí na tři desetinná místa dolů.[4]

(4.46.) Cena za nedodržení účinníku a cena za nevyžádanou dodávku jalové energie do distribuční soustavy se vztahuje na zákazníky připojené na napěťových hladinách VVN nebo VN, na výrobce elektřiny druhé kategorie připojené na napěťových hladinách VVN nebo VN a na provozovatele lokálních distribučních soustav připojené na napěťových hladinách VVN nebo VN.[4]

Pásma účinníku	Přírážka za nedodržení účinníku				
	$\text{tg } \varphi \text{ min}$	$\text{tg } \varphi \text{ max}$	$\cos \varphi \text{ min}$	$\cos \varphi \text{ max}$	Přírážka
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0	0,328	0,95	1	0
2	0,329	0,484	0,9	0,949	0,0285
3	0,485	0,750	0,8	0,899	0,1238
4	0,751	1,020	0,7	0,799	0,2807
5	1,021	1,333	0,6	0,699	0,4858
6	1,334	a více	0,0	0,599	1,0000

tab. 3-1: přírážka za nedodržení účinníku [4]

(4.54.) Za nevyžádanou dodávku jalové energie do sítě provozovatele distribuční soustavy účtuje provozovatel distribuční soustavy účastníkovi trhu definovanému v bodě (4.46.) cenu za nevyžádanou dodávku jalové energie do distribuční soustavy ve výši: 440 Kč/MVArh.[4]

### 3.3 Zlepšení účinníku

Často lze zlepšit účinník i bez kompenzace provedením následujících opatření:

- Nahrazením málo zatížených motorů motory o menších výkonech (potřeba jalového výkonu se zvyšuje s rostoucím výkonem motoru a je přibližně stejná, ať je motor zatížen úplně, částečně, nebo vůbec. Předimenzované motory i transformátory pracují s nízkým účinníkem)

- Omezením chodu motorů a transformátorů naprázdno (při chodu naprázdno pracují stroje s nízkým účíníkem, např. nezatížené transformátory představují téměř čistou jalovou zátěž s účíníkem 0,1 až 0,2)
- Připojení málo zatížených motorů na nižší napětí.[3]

## 4 Metody a způsoby kompenzace

V předchozích kapitolách jsem se věnoval osvětlení základních pojmů a výhodám kompenzace. Nyní přejdeme k popisu metod a způsobů jak co nejúčinněji využít kompenzační zařízení.

### 4.1 Umístění kompenzačních zařízení

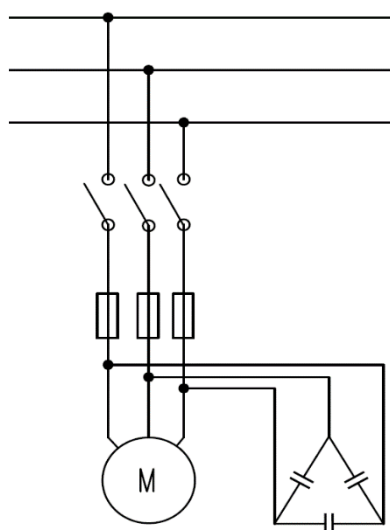
Podle umístění kompenzačních zařízení rozlišujeme několik typů kompenzací. Toto rozdělení rozlišuje druh a technickou realizaci kompenzačního zařízení a mimo jiné i správné dimenzování vedení.

#### 4.1.1 Individuální kompenzace

Každý spotřebič s induktivním výkonem se opatří samostatným kondenzátorem. Kondenzátor je připojen přímo na svorky koncového zařízení nebo v těsné blízkosti. Tímto způsobem je odlehčená soustava od jalového výkonu až ke spotřebiči, snižují se úbytky napětí na přívodním vedení. Z důvodu navržení přesné velikosti kompenzace pro dané zařízení není potřeba regulace jalového výkonu. Individuální kompenzace je jednodušší a provozně spolehlivější než zbývající způsoby.

Při nízkém využití zařízení je i využití kondenzátoru nízké. Technicky bývá náročnější na umístění kondenzátoru, který je umístěn u jednotlivých zařízení a tím pádem časově náročnější na údržbu, popřípadě na hledání závady. U spotřebičů s proměnlivou zátěží hrozí nebezpečí překompenzování účíníku. Individuální kompenzace je finančně dražší oproti ostatním metodám a to nejvíce u spotřebičů s nízkým využitím. Dle normy ČSN 33 3080 by měla být individuální kompenzace upřednostňována před ostatními typy kompenzace.[16]

Kompence je vhodná pro motory nad 5kW s dlouhodobým časovým využitím, pro kompenzaci magnetizačního proudu transformátoru, kompenzaci zářivkových svítidel a další zařízení.



obr. 4-1: individuální kompenzace

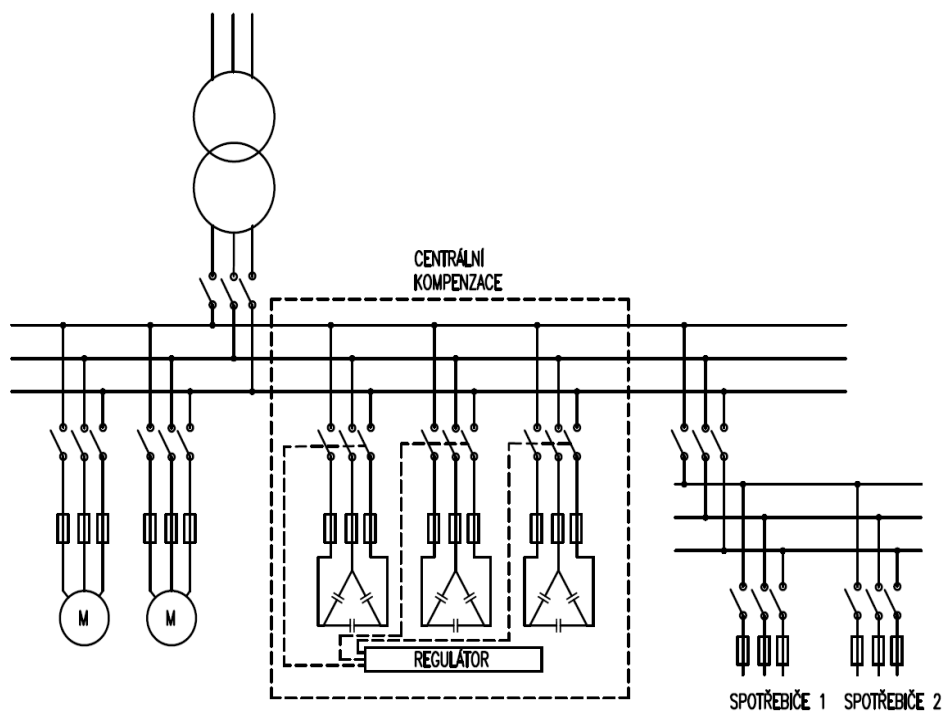
#### 4.1.2 Skupinová kompenzace

Skupinová kompenzace je připojena na přípojnice rozvaděče určeného pro napájení skupiny zařízení. Velikost kompenzační baterie je odvozena od soudobého výkonu a je rozdělena na více samostatně ovládaných skupin. Z důvodu navržení na soudobý výkon je velikost kompenzace menší než u individuální kompenzace. Tímto způsobem odlehčíme vedení od vstupní rozvodny ke skupinovému rozvaděči, ale vedení k jednotlivým zařízení již kompenzováno není. Řízení kondenzátorových skupin je nutné pomocí automatického regulátoru a jednotlivé skupiny musí být opatřeny jisticími a spínacími prvky. Použití je hlavně na hladině nízkého napětí a to u motorů s výkonem menším než 5kW s nízkým časovým využitím. [16]

#### 4.1.3 Centrální kompenzace

Centrální kompenzační rozvaděč je připojen na sběrnice hlavní rozvodny nebo v její blízkosti. Při tomto způsobu nejsou kompenzovány rozvody uvnitř podniku. Protože se kompenzace skládá z více kompenzačních skupin, je nutné použít regulátor jalového výkonu pro regulaci účinníku. Výhodou centrální kompenzace je umístění na jednom místě, což je jednodušší pro údržbu a není tak náročné na prostor. Protože kompenzovaný výkon opět počítáme ze soudobého je i zde zapotřebí nižšího kompenzačního výkonu, než u individuální kompenzace. Nevýhodou je potřeba složitějšího regulačního systému

k zaopatření správného vykompenzování. Z výše uvedených důvodu se centrální kompenzace hodí pro menší průmyslové závody s méně proměnlivou zátěží.



obr. 4-2: centrální kompenzace

#### 4.1.4 Kombinovaná kompenzace

Způsob, který kombinuje výhody všech výše uvedených typů kompenzace. Velké výkonné motory mají svoji individuální kompenzaci a pro zbytek zařízení slouží centrální kompenzace popř. kompenzace skupinová.

### 4.2 Kompenzační zařízení

Zde jsou rozebrána jednotlivá kompenzační zařízení, která jsou v dnešní době více či méně používána.

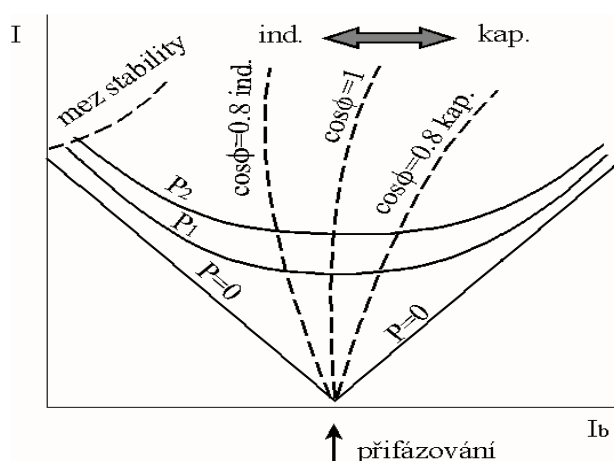
#### 4.2.1 Rotační kompenzační zařízení

Jedním ze způsobů kompenzace účinníku, který ovšem v dnešní době není moc využíván, je kompenzace pomocí synchronního motoru bez mechanického zatížení. Stator synchronního stroje se neliší od statoru asynchronního stroje. Na rotoru synchronního stroje je umístěno stejnosměrné budící vinutí, které dodává magnetizační energii pro stroj.

Synchronní kompenzátor se používá na místech, kde se neočekávají velké výkyvy zátěžných momentů a změny kmitočtu. Především jsou používány na hladině VN a VVN

jako prostředek pro regulaci napětí, udržení stability sítě a v neposlední řadě ke kompenzaci jalového výkonu. S ohledem na dobu reakce jsou vhodné k použití v sítích, kde nedochází k rychlým změnám odebíraného výkonu.

Řízením proudu budícím vinutím regulujeme účinník a to v oblasti induktivní i kapacitní. Závislost proudu statoru na budícím proudu má tvar V-křivek.



obr. 4-3: V-křivky synchronního stroje [5]

Z důvodu dosažení stálého účinníku při měnícím se zatížení je potřeba řídit budící proud. Synchronní motory jsou osazeny regulátory zajišťující chod s konstantním účinníkem nebo konstantním jalovým výkonem.

Synchronní stroje nejsou v dnešní době žádanou variantou pro kompenzaci. Z důvodu spotřeby činné energie, nutnosti umístění do obestavěného prostoru, složitější údržby a dlouhé reakční doby.

#### 4.2.2 Statické kompenzátory

V nejjednodušším pojetí jsou statické kompenzátory vytvořeny pomocí kompenzačních kondenzátorů. Složitější a v dnešní době používané jsou aktivní filtry. Statické kompenzátory oproti synchronním strojům jsou nezávislé na dodávce činného výkonu.

### 4.2.3 Kompenzační kondenzátory

Kompenzační kondenzátory patří k nejdůležitějším součástem systému pro kompenzaci jalového výkonu. Základní podmínkou pro použití je dodržení bezpečnostních opatření.

- spolehlivý a bezpečný provoz
- odolnost vůči přepětí
- tepelná stabilita kondenzátorů

### 4.2.4 Prosté kondenzátory

Kondenzátorové baterie slouží pro kompenzaci jalového výkonu induktivního charakteru. Jsou vyráběny jako jednofázové nebo třífázové. U třífázového kondenzátoru rozlišujeme, zda jsou zapojeny do hvězdy nebo trojúhelníku. Výhodou zapojení do trojúhelníku je větší kompenzační výkon, který je trojnásobný oproti zapojení do hvězdy, uvažujeme-li stejné kapacity kondenzátorů. Nevýhodou je sdružené napětí a tím zvýšený průchozí proud kondenzátorem, který je závislý na impedanci a napětí kondenzátoru. Z uvedených důvodů se kondenzátory používají na hladině nízkého napětí. Na hladině vysokého napětí je voleno zapojení do hvězdy a to z důvodu fázové hodnoty napětí na kondenzátoru a tím je hodnota procházejícího proudu třetinová.

Prosté kondenzátory jsou používány v provozech, kde je nízký podíl nelineární zátěže a kde nehrozí rezonance kapacity kondenzátoru s indukčností zátěže.

Celkový kompenzační výkon kondenzátoru.

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3C \quad (6)$$

Kde:  $Q_C$  - jalový výkon kondenzátoru

$U$  – napětí

$\omega$  – úhlová rychlost

$C$  – kapacita kondenzátoru

Kvalitu kondenzátoru ovlivňují ztráty v dielektriku, vnitřních pojistkách a vybíjecích rezistorů. U kondenzátoru na nízké napětí po odpojení klesne napětí na 50V po jedné minutě. Ztráty kondenzátoru velmi rostou při výskytu vyšších harmonických frekvencích. S rostoucí frekvencí klesá reaktance kondenzátoru a tím roste proud protékající kondenzátorem způsobující přetěžování. Současně bude přetěžována i síť mezi kondenzátorem a zdrojem harmonických.

Závislost reaktance na frekvenci:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)} \quad (7)$$

#### 4.2.5 Kondenzátory s hradíci tlumivkami

Hrazené kompenzace jsou určeny do sítí s obsahem vyšších harmonických a sítí, kde by mohla nastat rezonance s indukci napájecí sítě. Zlepšuje napěťové poměry v síti, zmírňuje rušivé účinky kompenzačních rozvaděčů na rozvodnou síť.

Hradíci tlumivka se zapojuje do série s kondenzátorem a pracují tak jako širokopásmový filtrační obvod pro harmonické nad rezonančním kmitočtem. Tím zamezuje přechodovým jevům, které přispívají k zmenšení životnosti kondenzátoru, stykačů a jisticích prvků.

Rezonanční frekvenci tlumivky a kondenzátoru volíme s ohledem, aby nedocházelo k rezonanci na charakteristické harmonické, což by mělo za následek zvýšené namáhání kondenzátoru. Sériový rezonanční obvod:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Velikost impedance v závislosti na frekvenci:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (9)$$

V praxi se u chráněné kompenzace užívá pojem činitel ztlumení  $p$ , který odpovídá rezonančnímu kmitočtu.

$$p = \frac{1}{\left(\frac{f_r}{f_n}\right)^2} = \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2 \quad (10)$$

Činitel ztlumení se určuje jako bezrozměrné číslo nebo v procentech.

Ze vztahu č. 10 můžeme určit rezonanční frekvenci pro činitele ztlumení. Pro 3. harmonickou ( $f=150\text{Hz}$ ) je činitel ztlumení 14%. Nejčastěji používaný je  $p=7\%$  pro 5. harmonickou ( $f=250\text{Hz}$ ) přitom rezonanční frekvence sériového obvodu tlumivky s kondenzátorem je 189Hz.

Vlivem hradíci tlumivky se zvýší napětí na kondenzátoru a je proto nutné kondenzátor navrhovat na vyšší napětí. U sítí nízkého napětí s činitelem ztlumení  $p=7\%$  se používají kondenzátory na jmenovité napětí 440V.

Při návrhu je potřebné nejdříve navrhnout kompenzační výkon a napěťovou hladinu, na kterou bude zařízení instalováno.

Reaktance kondenzátoru vypočteme pomocí jmenovitého sdruženého napětí kondenzátoru  $U_{Cn}$  a kompenzačního výkonu  $Q_C$ .

$$X_C = \frac{U_{Cn}^2}{Q_C} \quad (11)$$

Napětí na kondenzátoru je vlivem připojené tlumivky vyšší než síťové. Skutečná hodnota napětí na kondenzátoru  $U_C$  závisí na jmenovité hodnotě napětí sítě  $U_{SN}$  zvětšeným o činitele zatlumení  $p$ .

$$U_C = \frac{U_{SN}}{1 - p} \quad (12)$$

Reaktance LC obvodu:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad (13)$$

Reaktance tlumivky:

$$X_L = p \cdot X_C \quad (14)$$

Z předchozích vztahů zjistíme, že reaktance celkového obvodu bude vždy menší než reaktance kondenzátoru a proto je nutné stanovit skutečný kompenzační výkon.

Skutečný jalový výkon LC obvodu:

$$Q_{LC} = \frac{U_{SN}^2}{X_{LC}} \quad (15)$$

Z uvedeného vyplývá, že skutečný kompenzační výkon je nižší než výkon samotného kondenzátoru. Snížení výkonu kondenzátoru je způsobeno jednak předřazenou tlumivkou a také připojením kondenzátoru na nižší napětí než je jmenovité napětí kondenzátoru.

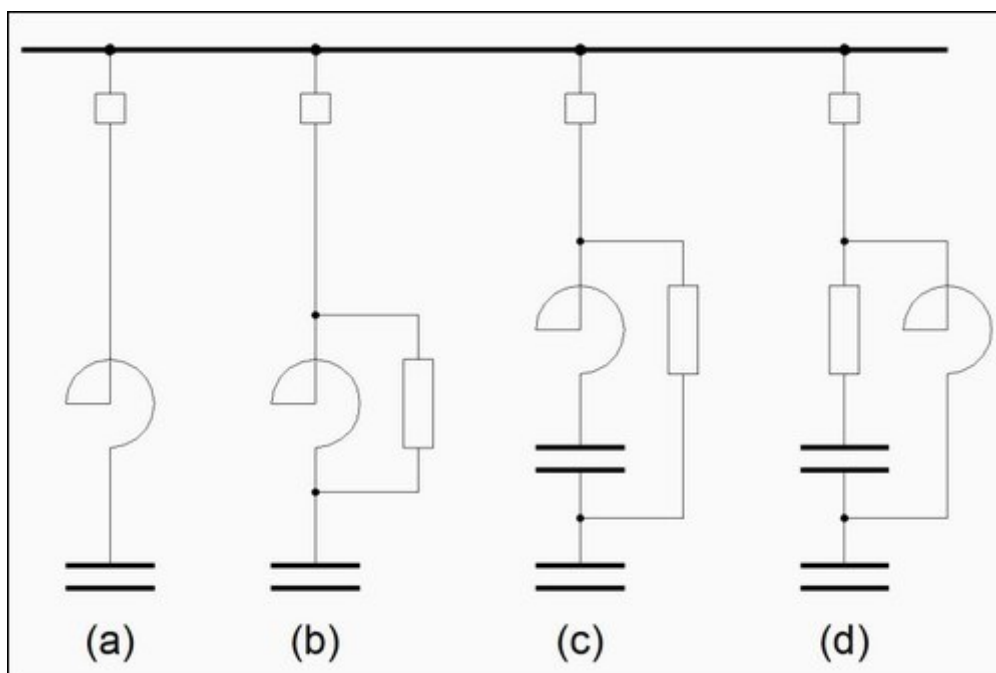
Jednou z nevýhod hrazení kompenzace je vyšší oteplení kompenzačního rozvaděče. Měrné ztráty dnes vyráběných kondenzátoru jsou okolo 0,5W/kVAr. Ztráty na hradicích tlumivkách jsou okolo 7W/kVAr. Z toho důvodu je nutné počítat s chlazením rozvaděče například pomocí ventilátorů.

### 4.3 Kompenzační filtr

Filtr se skládá z tlumivky, kondenzátoru a rezistoru. Zařazují se v místech, kde se vyskytují vyšší harmonické frekvence, které v síti způsobují zkreslení napětí a mohou být příčinou rušení dalších zařízení. Hlavními zařízeními způsobující rušení jsou usměrňovače



pro stejnosměrné pohony, elektrolýzy dále elektrické tepelné spotřebiče jako například indukční a obloukové pece a induktivní ohřevy. Filtr plní dvě funkce. První funkcí je kompenzace účinníku na frekvenci 50Hz a dále filtruje harmonické, na kterou je určen (harmonickou ve které je filtr v rezonanci, tudíž má nejnižší impedanci). Je-li hlavní funkce filtrace harmonické frekvence a dodávka kapacitního výkonu se omezuje pouze na minimum, hovoří se o takzvaném minimálním filtru.



obr. 4-4: kompenzační filtr [2]

Při navrhování kompenzačních filtrů je nutné vzít do úvahy mnoho parametrů, které mají vliv na jejich dimenzování, jde např. o:

- maximální dovolené napětí sítě,
- dovolené změny frekvence sítě,
- velikost filtrovaných harmonických proudů,
- požadovanou úroveň harmonických napětí v síti po filtraci,
- výrobní toleranci použitých tlumivek a kondenzátorů,
- frekvenční charakteristiku sítě s filtry a bez filtrů,
- vzájemný vliv signálu hromadného dálkového ovládání a filtrů,
- podmínky prostředí – teplota, znečištění atd.

Pro spolehlivou funkci filtrů jsou důležité správně dimenzované spínací prvky, ochrana proti spínacím přepětím, jištění proti nadproudům a zemním spojením atd.[8]

## 4.4 Způsoby řízení kompenzačního výkonu

Řízení, spínání a regulace kompenzačního výkonu lze provést několika způsoby popsanými v následujících kapitolách.

### 4.4.1 Kompenzátory se stupňovitou regulací

U stupňovitě řízené kompenzace je důležité nejprve stanovit počet a velikost jednotlivých stupňů. Určení velikosti stupňů je stejně důležité na hladinách nízkého i vysokého napětí a nezáleží, jestli se jedná o kompenzátory kontaktní nebo bezkontaktní. Volba počtu stupňů závisí na reálné velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě vykompenzování. Nejčastěji se pohybuje hodnota vykompenzování mezi  $\cos\varphi$  0,95-0,98 induktivní. [1]

Pro tyto podmínky musí být splněn vztah.

$$\frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \leq \operatorname{tg}\varphi \quad (16)$$

kde:

$Q_L$  - jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu  $P$

$Q_{C1}$  – jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

$N$  – počet stupňů

Z rovnice dostaneme vztah pro počet stupňů  $N$

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \operatorname{tg}\varphi}{Q_{C1}} \quad (17)$$

### Kontaktně spínané kompenzátory

Kontaktní kompenzátory pracují na principu postupného spínání kondenzátorů nebo chráněných sekcí pomocí řízení regulátorem jalového výkonu. Jednoduché zapojení kontaktních kompenzátorů s obyčejnými kondenzátory se používá v místech, kde se nevyskytují vyšší harmonické a kde není potřeba rychlé kompenzace. Při připojení klasických stykačů na síť vznikají přechodové jevy a tím i velké proudové rázy dosahující i třicetinasobku jmenovitých hodnot. Další nevýhodou nesynchronního spínání je rušivý jev při sepnutí jako zpětný vliv na síť, který může způsobovat rušení citlivých zařízení jako například zařízení výpočetní a regulační techniky. Tyto nežádoucí jevy lze částečně odstranit pomocí hrazené kompenzace a použitím stykačů s předstihovými odporovými kontakty.[1]

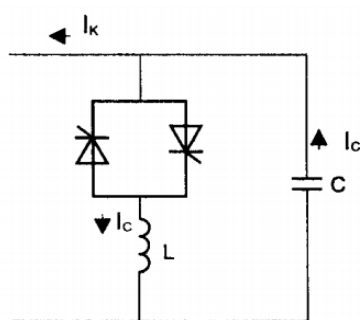
## Bezkontaktní spínané kompenzátory

Používají se v místech, kde je potřeba rychlé kompenzace kvůli okamžitým změnám jalového výkonu. Bezkontaktní spínače se používají v kombinaci rychlým regulátorem jalového výkonu a kondenzátory jsou použity s hradíci tlumivkami. Spínání je realizováno pomocí tyristorů, u kterých nedochází k přechodovým jevům díky spínání tyristoru při průchodu nulou.

## Kompenzátory s plynulou regulací

### s dekompenzačními členy

Plynulé řízení jalového procházejícího proudu lze uskutečnit řízením proudu procházejícího dekompenzační tlumivkou. Pomocí fázově řízených antiparalelně zapojených tyristorových spínačů, získáme plynulou regulaci jalového výkonu. Chceme-li řídit kapacitní proud je nutné k řízenému dekompenzačnímu členu paralelně připojit kondenzátorovou baterii. [1]



obr. 4-5: zapojení plynule řízeného kompenzáturu

Je-li proud  $I_C \geq I_L$ , pak výsledný kompenzační proud je:

$$I_K = I_C - I_L \quad (18)$$

a má charakter kompenzačního proudu měnícího se v rozmezí  $0 \leq I_K \leq I_L$ .

### plynulé řízení – aktivní

Aktivní filtr lze chápat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě pak lze vylepšit proud, napětí, nebo obojí. Podle těchto požadavků lze aktivní filtry dělit na paralelní, sériové a kombinované.[1]

## 5 Přístroje použité v kompenzačních zařízeních

Kompenzační zařízení se skládá z mnoha na sebe navazujících přístrojů, které spolu musí běžet v součinnosti jako jeden funkční celek. Samozřejmě se nejedná pouze o přístroje, ale i o samotné rozvržení a osazení přístrojů do rozvaděčových skříních tak, aby byla zaručena funkčnost zařízení. Například musíme počítat se ztrátovým výkonem tlumivek z důvodu navržení chlazení rozvaděče.

### 5.1 Regulátor jalového výkonu

Regulátory jalového výkonu pracují na principu aktuálního vyhodnocení účinníku sítě a porovnáním s požadovaným účinníkem. Na základě porovnání vyhodnotí spínání či odpínání kompenzačních stupňů. Dřívější analogové kompenzátory byly nahrazeny digitálními regulátory s mikroprocesorem využívající logické operace pro komfortnější uživatelské prostředí. Starší regulátory pracovaly na principu odečtení proudu při průchodu napětí nulou. Tato regulace je v sítích s vyššími harmonickými a větším zkreslením nevhodná, protože zkreslením může docházet k chybám vyhodnocení a tím i k nesprávnému spínání kompenzačních stupňů.

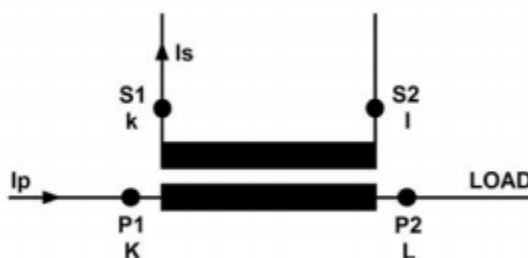
Moderní regulátory jsou vybaveny přesným napěťovým a proudovým měřícím obvodem. Digitálním zpracováním naměřených hodnot je dosaženo vysoké přesnosti vyhodnocení hodnot napětí, proudu i účinníku. Výpočet harmonických složek se provádí algoritmem FFT. Tím je zajištěna přesná funkce měření a regulace i v podmínkách harmonického zkreslení. Instalace přístroje bývá plně automatizována. Regulátor automaticky zjistí jak způsob připojení, tak velikost jednotlivých připojených kompenzačních stupňů (u některých typů regulátorů musí být následující stupeň stejně velký jako předchozí nebo dvakrát tak velký). Regulace probíhá ve všech čtyřech kvadrantech. Připínání a odpínání kompenzačních kondenzátorů je prováděno tak, aby byl optimální stav kompenzace dosažen jediným regulačním zásahem a minimálním počtem přepínaných stupňů. Přístroje volí takzvané kruhové spínání, kdy jednotlivé stupně s ohledem na jejich rovnoměrné zatěžování přednostně připíná stupně, které byly odepnuty nejdéle a tím dochází k rovnoměrnému zatížení všech stupňů. Vedle kompenzačních kondenzátorů lze k regulátorům připojit i kompenzační tlumivky (dekompenzace sítě).[10]



obr. 5-1: regulátor jalového výkonu

## 5.2 Měřicí transformátory proudu

V místech kde se běžně vyskytují proudy v řádu stovek, až tisíců ampér používáme pro odečtení odebíraného proudu měřicí transformátory proudu (MTP). Funkce je založena na principu elektromagnetické indukce. Při průchodu proudu primárním vinutím se v jádře transformátoru vybudí magnetický tok, který indukuje proud sekundárního vinutí.[11]



obr. 5-2: schéma MTP [12]

Primární vnutí MTP je tvořeno přímo připojovacím vodičem. Pro kompenzaci jalového výkonu je důležitá minimální chybovost transformátorů. Pro nízké napětí stačí použít transformátory proudu, jelikož regulátory jalového výkonu jsou na toto napětí konstruovány.

Vzhledem k tomu, že do sekundárních obvodů přístrojových transformátorů proudu instalovaných v hlavních přívodech kompenzovaných rozvaděčů jsou připojeny kromě panelových měřících přístrojů velmi často i proudové cívky elektroměrů, doporučuje se pro potřeby regulace jalového výkonu instalovat další přístrojový transformátor. Ve většině případů je dostatečné použít měření pouze na jedné fázi, přičemž napětí je přiřazeno mezi fáze L1 a L2 nebo mezi L1 a zem.[1].



obr. 5-3: měřící transformátor proudu [12]

### 5.3 Kondenzátory

Teoretickému rozboru kondenzátoru se věnuje již kapitola 3.4.2. Zde je popsána samotná konstrukce kondenzátoru.

Kondenzátory jsou vyráběny systémem MKP, který tvoří metalizovaná polypropylénová fólie s velmi nízkými dielektrickými ztrátami. Dielektrický systém v suchém provedení je samo-regenerační, po průrazu dielektrika krátkým napětovým přetížením dojde v mikrosekundách k odpaření elektrody v oblasti průrazu a k opětovnému obnovení jeho izolační pevnosti. Vlastní svitky jsou zality v pevné kompaktní hmotě rostlinného původu, která je netoxická a ekologicky nezávadná. Proto nehrozí znečištění životního prostředí, např. průsakem impregnační kapaliny. Nádoba kondenzátoru je chráněna proti roztržení přetlakovým odpojovačem, který zajistí bezpečné odpojení kondenzátoru od sítě při přetížení, stárnutí nebo na konci vlastní životnosti. Kondenzátory jsou vybaveny třemi vybíjecími rezistory.[7]



obr. 5-4: kompenzační kondenzátory

Při zapojení musí být dodrženy zásady:

- Připojení ochranné svorky se provádí podle doporučení ČSN 33 0360. Každý kondenzátor má na dně ochranný svorník nebo na těle kondenzátoru ochrannou svorku.
- Vodiče musí být připojeny tak, aby umožnili dilataci víka kondenzátoru pro správnou funkci přetlakové komory.
- Šrouby ve svorkách kondenzátoru nutno utahovat maximálním doporučeným momentem, aby nedošlo k poškození víka a omezení funkce odpínací pojistky.
- Paralelní propojení kondenzátorových baterií provádět pouze u kondenzátorů k tomuto účelu určených. Přívod od zdroje k prvnímu kondenzátoru musí být dimenzován na celkový proud kondenzátory.

## 5.4 Tlumivky

Tlumivky pro kompenzační zařízení rozdělujeme na tlumivky ochranné, dekompenzační a filtrační.



obr. 5-5 hradící tlumivky [18]

### 5.4.1 Ochranné tlumivky

Jsou důležitou součástí chráněných kompenzačních sekcí. Nejčastěji se používají u stupňovité kompenzace se stykačovým nebo bezkontaktním spínáním. Tlumivky omezují zapínací proudový ráz a tím se prodlužuje doba životnosti spínacích prvků a kondenzátorů. Výrazným zlepšením se jeví zařazení tlumivky ke každému kondenzátoru. Dále zabraňují nepříznivým rezonančním jevům v napájecí síti. Rezonanční jevy deformují křivku napětí v připojeném bodě a mohou způsobovat přetížení kondenzátorů napětím a proudem. Rezonanční jevy bývají vybuzeny nelineárními spotřebiči, jako jsou tyristorové měniče,

svářečí stroje a indukční pece. Ochranné tlumivky spolu s kondenzátorem tvoří sériový rezonanční obvod naladěný na kmitočet ležící mezi 150 – 250Hz nebo mezi 100 – 150 Hz. Kmitočet je volen tak, aby nemohlo dojít k rezonanci na některé charakteristické harmonické, která by způsobila přetížení kondenzátoru. Z teorie obvodů vyplývá, že ochranu před rezonancemi poskytuje přeladění obvodu do kmitočtového pásma, v němž se nevyskytuje budící kmitočet charakteristické harmonické.

#### **5.4.2 Dekompenzační tlumivky**

Používají se podobně jako kondenzátorová baterie ke kompenzaci výkonu. V místech kde je nadbytek kapacitního výkonu, například v dnešní době vlivem LED osvětlení se do kompenzačních rozvaděčů instalují dekompenzační tlumivky. Další použití je ve spojení s plynule řízenými kompenzátory jalového proudu viz kapitola 4.4.1. Dekompenzační tlumivka se navrhuje na jmenovité napětí s reaktancí, jejíž reaktivní výkon odpovídá potřebnému dekompenzačnímu výkonu.[1]

### **5.5 Jistící a spínací přístroje**

Norma ČSN 33 3080 (kompenzace indukčnosti výkonu statickými kondenzátory) určuje jištění kompenzační dle normy ČSN 2000-4-43 a dle zásad jištění spotřebičů ČSN 34 1630. Pro kompenzační zařízení nízkého napětí je nejvhodnějším jištěním pomocí pojistek s patřičnou vypínací schopností a zkratovou odolností. Z důvodu jištění vzhledem k přechodovým jevům jsou používány pojistky typu gG (gL). Dimenzování pojistek je cca na 1,3 násobek jmenovité hodnoty kondenzátorové baterie u nechráněné kompenzace a cca 1,5 násobek u chráněné kompenzace. V případě jištění více kompenzačních sekcí jedním odpojovačem je nutné pojistky i přívodní vodiče k první sekci kompenzovat na celkový proud.

Pro spínání kondenzátorových jednotek je nutné použít speciální stykače s dvoustupňovým tzv. odporovým spínáním. Tyto stykače omezují zhruba 10-15 krát přechodový děj, který vzniká při nabíjení kondenzátoru prostými vzduchovými stykači a může dosáhnout v případě připojovaného kondenzátoru k již sepnuté baterii až 150 násobku jmenovitého proudu (tato amplituda je funkcí impedance přívodního vedení). Použití těchto stykačů nám umožňuje dimenzovat předřazené pojistky (s “pomalou” charakteristikou gG/gL) kondenzátorů na hodnotu 1,6-2,0 jmenovitého proudu. [15]



## 6 Návrh kompenzačního rozvaděče

V této kapitole bude rozebrán návrh kompenzačního rozvaděče.

### 6.1 metody návrhu kompenzačního zařízení

**Součtová metoda** - nejdříve se individuálně stanoví jalový výkon pro všechny zdroje jalového proudu, které budou centrálně kompenzované. Celkový součet kompenzačního výkonu je nutné vynásobit koeficientem soudobosti a výsledek zvýšit o 5 až 10%.

**Analýza sítě** - v dnešní době již existují přístroje nazývané analyzátory sítě nebo též kvalimetry. Jsou to měřicí přístroje sloužící k měření napětí a proudu a pro výpočet dalších parametrů jako je činný výkon, jalový výkon, flicker, harmonické složky proudů a napětí, poklesy a překmity napětí a další parametry. Tudiž připojením analyzátoru sítě zjistíme činný a jalový výkon a můžeme spočítat požadovaný výkon kompenzačního rozvaděče tak, aby byl účinník v předepsaných mezích. Analýzu sítě je nutno dělat za provozu všech zdrojů proudu, které budou centrálně kompenzovány a které mohou současně být v provozu. Tato metoda je použita pro níže uvedený návrh kompenzačního zařízení.

Regulátor jalového výkonu v závislosti na skutečné potřebě kompenzačního výkonu připojuje či odpojuje kompenzační stupně. Je potřeba zajistit, aby se účinník stále pohyboval mezi hodnotami 0,95 až 1, tedy aby nebyla síť nedekompensována nebo překompenzována. To znamená, že hodnota kompenzačních stupňů by měla odpovídat možnému zvyšování či snižování jalového výkonu. Kritériem pro stanovení hodnoty prvního stupně bude velikost minimálního výkonu kompenzované části. V případě většího počtu menších zdrojů (a tím i menších jalových výkonů) připojovaných a odpojovaných náhodně bude potřeba navrhnout malou hodnotu prvního kompenzačního stupně. [16]

### 6.2 Vybraný objekt

Navrhovaný kompenzační rozvaděč je pro průmyslový objekt, který se zaměřuje na výrobu betonových a železobetonových dílů. Vyznačuje se uceleným sortimentem betonových výrobků pro inženýrské a pozemní stavitelství. Nosnou částí je produkce trubního a šachtového programu pro kanalizační a dopravní sítě. Výrobní program doplňují drobné betonové prvky jako obrubníky, příkopové dílce, bednicí tvárnice a další prvky dle požadavků zákazníka.

Jedná se o starší výrobní závod po rekonstrukci, kde přestal z důvodu vadného

regulátoru kompenzační rozvaděč fungovat. Jelikož byl stávající rozvaděč funkční od roku 1999 bylo rozhodnuto o výrobě nového rozvaděče zhotoveného na základě interní analýzy sítě. V novém rozvaděči je nutné počítat s rezervou z důvodu dalších rekonstrukcí a doplnění nových výrobních zařízení.

Základní technické údaje:

- Provozní napětí NN: 3 PEN AC 50 Hz 400V/TN-C

Ochrana před úrazem el. proudem:

základní: izolací, kryty, přepážkami

- při poruše:
- automatickým odpojení od zdroje a proudovým chráničem
  - automatickým odpojením od zdroje a doplňujícím pospojováním
  - dvojitá nebo zesílená izolace, ochrana základní i při poruše

Ochrana proti účinkům SEMP: SPD tř. 1,2,3 s omezením přepětí a použitím selektivních ochran úrovně 4kV, 2,5kV, 1,5kV, 1kV – určeno dle požadavků jednotlivých profesí

- Způsob měření el. energie: fakturační měření je umístěno na straně VN.

### 6.3 Výkonová bilance objektu

- instalovaný příkon objektu: 160 kW
- soudobý příkon objektu: 100 kW
- Transformátor 22/0,4: transformátor 400 kVA
- Měsíční spotřeba cca 16 100kWh

Napojení objektu je pomocí kabelů VN vedoucích k transformátoru 22kV/NN.

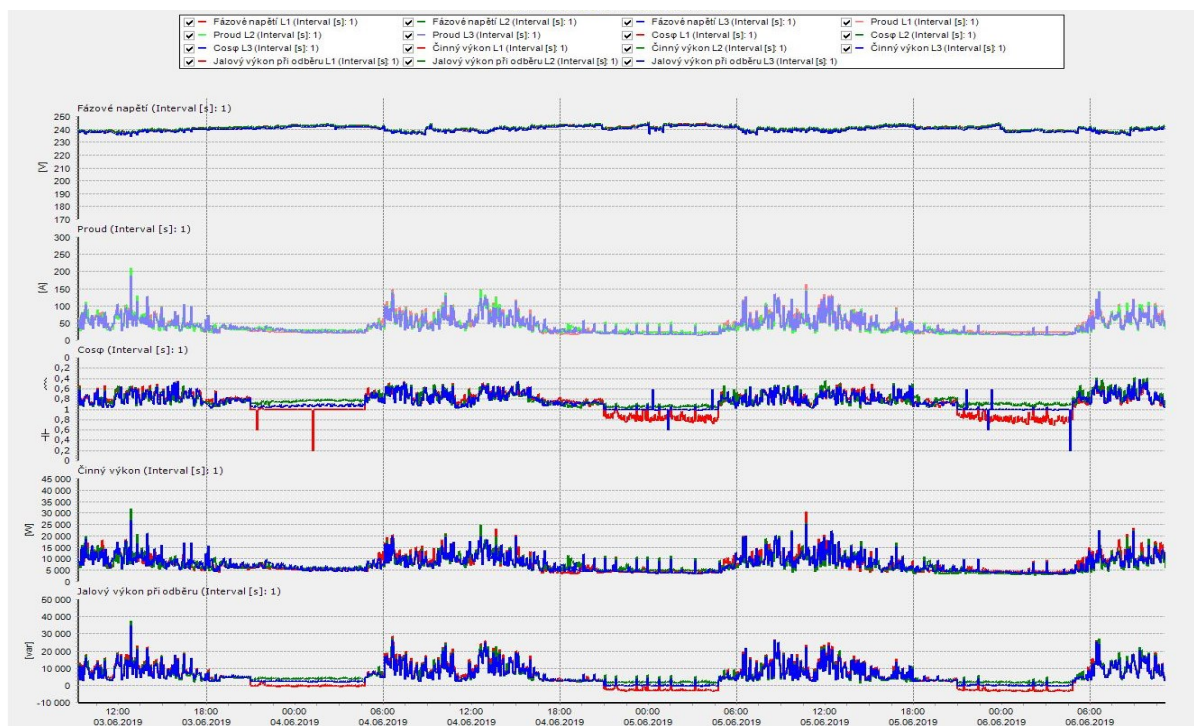
Vedení NN z transformátoru je ukončeno v hlavním rozvaděči.

### 6.4 Návrh

Kompenzační rozvaděč bude napájen z hlavního rozvaděče, odkud bude vyveden kabel CYKY 4x185 pro kompenzační rozvaděč. Na přípojnicí hlavního rozvaděče bude osazen měřicí transformátor proudu pro vyhodnocování regulace jalového výkonu.

Při provozu výrobního závodu byl na sběrnici hlavního rozvaděče připojen analyzátor, který po dobu 3 dnů měřil základní parametry sítě – U, I, P, Q, dále i vyšší harmonické U, I.

Na základě naměřených hodnot je vypočten výkon kompenzačního rozvaděče tak, aby v místě předávacího měření byl účinník  $\cos \varphi$  roven 0,95-1 induktivní.



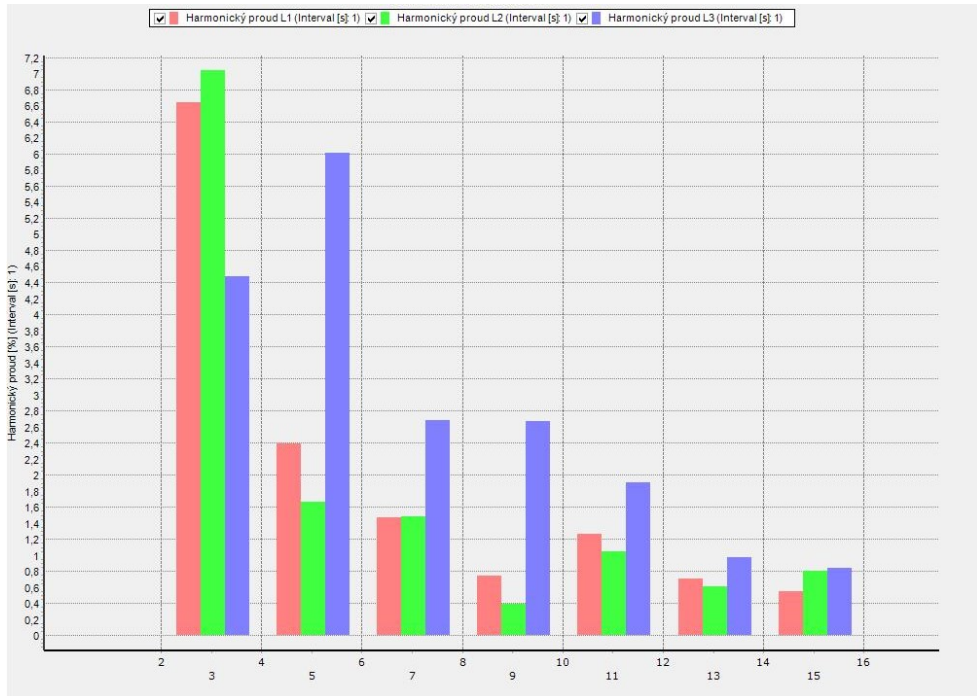
obr. 6-1: Analýza sítě

Z dat získaných analýzou sítě pomocí analyzátoru PLA44 (viz obr. 6-1) vychází v době měření maximální denní činný výkon  $P = 75\text{kW}$ , jalový výkon  $Q = 9\text{kVAr}$ . Tudíž objekt vykazuje charakter induktivní zátěže s účínkem  $\cos \varphi = 0,689$ . Z důvodu nevyžádané dodávky jalové energie do sítě je nutné výkon dokompenzovat na účíník  $\cos \varphi = 0,95 - 1$  induktivní. Minimální výkon objektu je  $P = 8,1\text{kW}$ , jalový výkon  $Q = 4,3\text{kVAr}$ . V nočních hodinách, kdy téměř žádná výrobní zařízení neběží, je vlivem LED osvětlení v jedné fázi účíník kapacitní s maximálním kapacitním jalovým výkonem  $3\text{kVAr}$ . Jelikož je tento jalový výkon pouze v jedné fázi bylo doporučeno LED osvětlení rozfázovat rovnoměrně mezi všechny fáze. V době měření byla průměrná denní spotřeba elektrické energie  $629\text{kWh}$ .

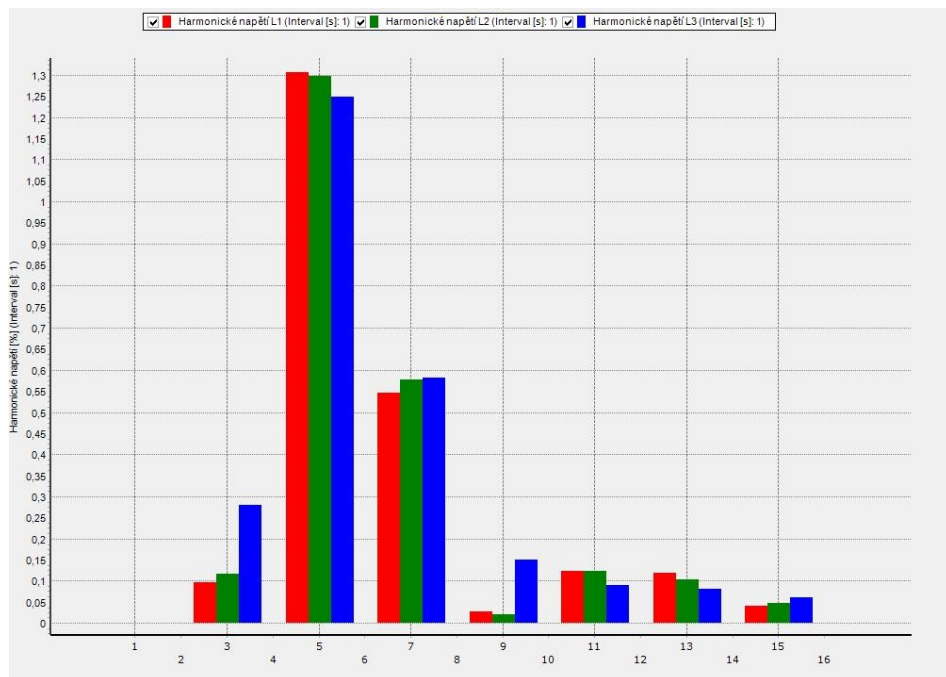
Podle změřených hodnot bude navržen ústřední kompenzační rozvaděč. Celkový kompenzační výkon musí být stanoven tak, aby byly vytvořeny podmínky pro dosažení hodnoty účíniku v rozmezí  $0,95$  (induktivní) až  $1$ . Toho dosáhneme pomocí regulátoru jalového výkonu, který udrží skutečnou hodnotu účíniku v předepsaných mezích stanovených tarifními podmínkami.

## Harmonické napětí a proudy:

Z analýzy sítě vidíme grafy harmonických vyšších řádů, podle kterých rozhodneme o potřebě chráněné kompenzace nebo filtrů vyšších harmonických.



obr. 6-2: harmonické proudy I



obr. 6-3: harmonické napětí U

Na grafech vyšších harmonických dosahují nejvyšších hodnot 3. a 5. harmonická proudu. Celkové harmonické zkreslení proudu dosahuje hodnot THDi = 16% a napětové zkreslení THDu = 4%. Kompenzační rozvaděč bude konstruován jako chráněná kompenzace a to z důvodů, že podíl nelineárních zařízení je v objektu vyšší než 20% a kvůli možnosti rozšíření výrobního závodu, kdy by se mohlo zvýšit i celkové zkreslení.

V celém objektu je jako dodavatel elektrotechnických produktů zvolena firma Eaton, proto i v kompenzačním rozvaděči bude snaha najít vhodné přístroje od této firmy.

#### Kompenzační výkon

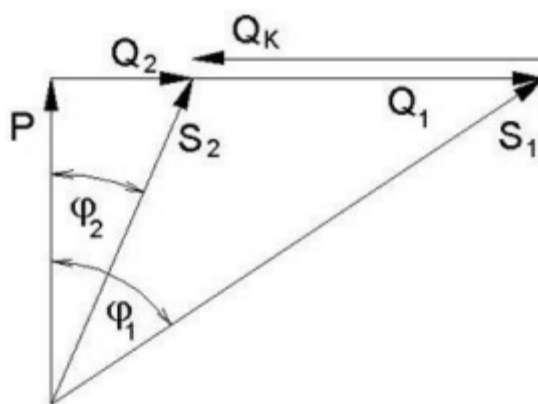
K určení kompenzačního výkonu vyjdeme z hodnot činného a jalového výkonu.

Ztrátový činitel  $\text{tg } \varphi$

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q}{P} \quad [-; \text{VAr}; \text{W}] \quad (19)$$

Výkon kompenzačního rozvaděče určíme pomocí účinníku  $\cos \varphi = 0,95$

$$Q_C = P \cdot (\text{tg } \varphi - \text{tg } \varphi_K) \quad (20)$$



obr. 6-4: fázorový diagram

Ze záznamů analýzy sítě vybereme maximální a minimální potřebný kompenzovaný výkon. Z minimálního kompenzačního výkonu stanovíme hodnotu nejmenšího stupně pro kompenzaci.

maximální výkon:  $P=75\text{kW}$  ;  $Q=79\text{kVAr}$

minimální výkon:  $P=8,1\text{kW}$  ;  $Q=4,3\text{kVAr}$

Skutečný účinník pro maximální naměřený výkon

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{75}{\sqrt{75^2 + 79^2}} = 0,689 \quad (21)$$

Ztrátový činitel pro maximální naměřený výkon

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{79}{75} = 1,053 \quad (22)$$

Kompenzační výkon pro kompenzování na účinník 0,98 ( $\operatorname{tg} \varphi_k = 0,203$ )

$$\begin{aligned} Q_C &= P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) = 75 \cdot (1,053 - 0,203) \\ &= 63,75 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (23)$$

Skutečný účinník pro minimální naměřený výkon

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{8,1}{\sqrt{8,1^2 + 4,3^2}} = 0,883 \quad (24)$$

Ztrátový činitel pro minimální naměřený výkon

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{4,3}{8,1} = 0,531 \quad (25)$$

Kompenzační výkon pro kompenzování na účinník 0,98 ( $\operatorname{tg} \varphi_k = 0,203$ )

$$\begin{aligned} Q_C &= P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) = 8,1 \cdot (0,531 - 0,203) \\ &= 2,657 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (26)$$

Z minimálního potřebného kompenzačního výkonu a charakteru sítě je zvolen první stupeň kompenzace, který bude vytvořen pomocí kondenzátoru s jalovým výkonem  $Q_C = 3,15$  kVAr. Jelikož jsou voleny kompenzační kondenzátory na napětí 440V a jsou předřazeny hradicí tlumivkou, musíme vypočítat skutečný výkon. Tlumivky jsou voleny s činitelem zatlumení  $p = 7\%$ .

Napětí na kondenzátoru při sériovém spojení s hradicí tlumivkou

$$U_C = \frac{U_{sn}}{1 - p} = \frac{400}{1 - 0,07} = 430,1 \text{ V} \quad (27)$$

Kvůli zvýšenému napětí od předřazené tlumivky budou vybrány kondenzátory se jmenovitým napětím  $U_C = 440\text{V}$ . Budou použity kondenzátory od firmy ZEZ-Silko typ Heavy Duty. Tyto kondenzátory jsou určeny pro provoz v náročných podmínkách, kde je možné očekávat vysoké hodnoty přetížení: napětí, proud (harmonické), teplota. Nabízí ideální řešení pro tzv. hrazené kompenzační rozváděče s tlumivkami, které jsou instalovány ve výše uvedených náročných provozech. Heavy Duty kondenzátory se vyznačují dlouhou životností, odolností proti napěťovému a proudovému přetížení, stejně

jako expozicí vysokým teplotám. Deklarované hodnoty výrazně převyšují požadavky norem IEC 60831 a UL 810.[17]

Typ	Zapojení	Napětí $U_N$ [V]	Výkon $Q_N$ [kvar]	kapacita $C_N$ [ $\mu$ F]	Proud $I_N$ [A]	rozměr [mm]	konstrukce
GSADG-0,44/3,15-HD	3-fázové, trojúhelník	440	3,15	3x17,3	4,1	85x175	MKP, dry-N2
GSADG-0,44/6,25-HD	3-fázové, trojúhelník	440	6,25	3x34,3	8,2	85x175	MKP, dry-N2
GSADG-0,44/12,5-HD	3-fázové, trojúhelník	440	10	3x68,5	16,4	85x245	MKP, dry-N2
GSADG-0,44/25-HD	3-fázové, trojúhelník	440	25	3x137	32,8	100x245	MKP, dry-N2

tab. 6-1: kondenzátory heavy duty [17]

Pro uvažovanou kondenzátorovou baterii  $Q_C=3,15\text{kVAr}$  vypočteme skutečný výkon s předřazenou tlumivkou.

Reaktance kondenzátoru

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 17,3 \cdot 10^{-6}} = 61,33 \Omega \quad (28)$$

Reaktance sériového spojení tlumivky a kondenzátoru

$$X_{LC} = (1 - 0,07) \cdot X_C = (1 - 0,07) \cdot 61,33 = 57,04 \Omega \quad (29)$$

Výkon sériového spojení tlumivky a kondenzátoru

$$Q_{LC} = \frac{U_{Sn}^2}{X_{LC}} = \frac{400^2}{57,04} = 2,8 \text{ kVAr} \quad (30)$$

Proud kondenzátorovou baterií stanovíme podle rovnice:

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{Sn}} = \frac{2,8}{\sqrt{3} \cdot 400} = 4,04 \text{ A} \quad (31)$$

Reaktance sériové tlumivky

$$X_L = p \cdot X_C = 0,07 \cdot 61,33 = 4,293 \Omega \quad (32)$$

Výsledná indukčnost sériové tlumivky

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{4,293}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 13,7 \text{ mH} \quad (33)$$

Hradící tlumivky budou vybrány rovněž od firmy ZEZ Silko. Tlumivky ZEZ SILKO jsou vyráběny z vysokojakostních transformátorových plechů, hliníkových pásů a měděných drátů. Díky tomu se vyznačují vysokou linearitou a nízkými ztrátami.

Vakuová impregnace speciální pryskyřicí zajišťuje vysoké napět'ové namáhání, minimální hlučnost a dlouhou životnost. Tlumivky jsou vybaveny tepelnou ochranou zabráňující přehřátí, konce vinutí jsou zakončeny ve svorkovnici (Cu drát) nebo ploché přípojnicí (Al pas), případně doplněny kabelem délky 1m (Cu tlumivky).[18]

Typ	Výkon L-C, $U_N$ [kvar]	Výkon konden. $Q_N$ [kvar]	kapacita $C_N$ [ $\mu$ F]	indukčnost $L_N$ [mH]	Proud $I_N$ [A]	rozměr [ $\text{\AA}$ xHLxV] [mm]	Hmotnost [kg]	Ztráty [W]
TKC1-03,15-189/400/440	2,80	3,15	3x17,3	13,7	4,0	155x92x140	4,5	33
TKC1-06,25-189/400/441	5,55	6,25	3x34,3	6,9	8,0	155x92x140	4,6	56
TKC1-12,5-189/400/442	11,11	12,50	3x68,5	3,46	16,0	180x110x160	8,6	50
TKA1-25-189/400/443	22,22	25	3x137	1,73	32,1	235x150x160	13	114

tab. 6-2: hradící tlumivky [18]

## 6.5 Zvolené velikosti stupňů kompenzace

Ze zjištěného minimálního a maximálního výkonu a z měřeného charakteru sítě byly vyvozeny stupně kompenzačního rozvaděče. Rozvaděč bude konstruován s nejmenším stupněm  $Q_N=2,80\text{kVAr}$  pro pokrytí minimálních ztrát. Celkově bude rozvaděč navržen s kompenzačními stupni v poměru: 1:1:1:1:2:2:2:4:4:8:8 s celkovým kompenzačním výkonem  $100,8\text{kVAr}$ . Maximální potřebný kompenzační výkon je  $63,75\text{kW}$ . Z toho vyplývá kompenzační rezerva  $37,05\text{kVAr}$ , která je určena pro možnost navýšení odběru výrobního závodu. Jednotlivé kompenzační stupně jsou navrženy tak, aby bylo možné vykompenzovat jakýkoliv jalový výkon.



Tabulka velikosti  
kompenzačních stupňů

Stupeň	$Q_N$ [kvar] kapacitní	$Q_N$ [kvar] induktivní
1.	2,80	/
2.	2,80	/
3.	2,80	/
4.	2,80	/
5.	5,60	/
6.	5,60	/
7.	5,60	/
8.	5,60	/
9.	11,20	/
10.	11,20	/
11.	22,40	/
12.	22,40	/

tab. 6-3: kompenzační stupně

## 6.6 Jištění

Pro kompenzační rozvaděč nízkého napětí je jako nejvhodnější jisticí prvek volena pojistka s patřičnou vypínací schopností a zkratovou odolností instalovaná v pojistkových odpínačích. Vhodné jsou pojistky s pomalou vypínací charakteristikou (typ gG). Velikost pojistky dimenzujeme cca na 1,6 násobek velikosti proudu jištěné kompenzační baterie. Budou voleny pojistkové odpojovače pro válcovou pojistkovou vložku typu PV10 pro velikost 10A, 16A, PV14 pro velikost 32A, 50A.

Tabulka pro velikost jisticí pojistky pro kompenzační baterie.

$I_N$  – jmenovitá hodnota proudu kompenzační baterií

$I_{NP}$  – hodnota předřazené pojistky

Dimenzování pojistek

$Q_N$ [kvar]	$I_N$ [A] pro 440V	$I_{NP}$ [A] pro 440V
3,15	4	10
6,25	8	16
12,5	16	32
25	32,1	50

tab. 6-4: dimenzování pojistek

## 6.7 Stykače

Výkonové stykače pro zařízení ke kompenzaci jalového proudu. Tyto kompenzační stykače mají předřadný odpor a speciální materiál kontaktů, který je odolný proti svaření. Kondenzátory se nabíjí přes předbíhající pomocné kontakty a předřadné odpory a teprve potom sepnou hlavní kontakty, které vedou trvalý proud. [6]

Dimenzování stykačů pro jednotlivé velikosti kompenzačních stupňů.

	Jmenovitý výkon třífázových kondenzátorů 50 - 60 Hz bez krytu				Schéma zapojení
	230 V kvar	400 V kvar	525 V kvar	690 V kvar	
<b>Kompenzační stykače DILK</b>					
S předřadnými odpory Základní přístroje	7,5	12,5	16,7	20	
	11	20	25	33,3	
	15	25	33,3	40	
	20	33,3	40	55	
	25	50	65	85	



obr. 6-5: kompenzační stykače

## 6.8 Regulátor jalového výkonu

Na základě potřebného počtu kompenzačních stupňů a na charakteru sítě je zvolen regulátor BMR FCR 12. Regulátor jalového výkonu je určen k řízení účinníku v sítích NN 50/60 Hz. Regulátor FCR patří mezi tzv. rychlé regulátory, je totiž schopen regulovat až 17 krát za sekundu. Může tedy ovládat kromě klasických kondenzátorových stupňů se stykači i „rychlé“ polovodičové stupně, které spínají v „nule“ a není tedy u nich nutná prodleva pro vybití kondenzátoru. Regulátor kromě účinníku zobrazuje veličiny:

- sdružené napětí mezi fázemi
- proud v měřené fázi
- frekvenci síťového napětí
- činný výkon
- jalový výkon
- lichý harmonický proud (1. - 19.) v %
- koeficient harmonického zkreslení proudu THDI
- liché harmonické napětí (1. - 19.) v %
- koeficient harmonického zkreslení napětí THDU
- počty sepnutých stupňů

Přístroj je 12-ti kanálový s reléovými výstupy. Napájecí napětí musí být k regulátoru přivedeno z kontrolované sítě, protože z napájecího napětí je odvozeno i napětí měřící. Jako měřící proud je potřebné použít proud ve zbývající fázi. Standartní zapojení v síti 3x400V je takové, že napěťové svorky regulátoru jsou připojeny na fáze L2, L3 a na proudové svorky je přiveden měřící proud z fáze L1. Přístroj využívá v rámci jednotlivých výkonových hladin metodu kruhového spínání. Vždy zapíná ten stupeň v příslušné výkonové hladině, který je vypnut nejdéle. Během regulace provádí přístroj průběžnou kontrolu jednotlivých kompenzačních stupňů. Při zjištění změny hodnoty stupně je stupeň na 24 hodin odstaven a pak je znovu zapojen do regulace. Pokud regulátor znovu zjistí na tomto stupni nějaký problém, stupeň odpojí natrvalo a signalizuje na příslušné LED jeho poruchu. Kromě kompenzačních kondenzátorů jde k přístroji připojit i dekompenzační tlumivky, jejichž výkon je registrován s opačným znaménkem. Pro dekompenzační tlumivky platí, že musí být připojen vždy za poslední kondenzátorový stupeň.

### **6.8.1 Nastavení regulátoru.**

1) Nejprve na regulátoru nastavíme požadovaný účinník.  
parametr COS1 – nastavíme na 0,98.

2) Převod proudového transformátoru  $I_{tr} = 315A$

Zbylé nastavení ponecháme. Regulátor po spuštění auto detekce sám detekuje jednotlivé velikosti kompenzačních stupňů.

## **6.9 Vodiče**

Kompenzační rozvaděč bude připojen k hlavnímu rozvaděči pomocí kabelového vedení. Délka kabelového vedení je 15m. Vhodný průměr vedení ověříme podle níže uvedených vzorců. Vodič bude uložen na kabelovém žlabu volně se souběhem 3 kabelů včetně uvažovaného. Z normy ČSN 33 2000-5-52 ed.2 určíme přepočítávací koeficient pro souběh kabelů (koeficient  $k_2=0,95$ ), uvažovaná okolní teplota je 30°C (koeficient  $k_1=1$ ) tedy není potřeba brát v úvahu.

parametry transformátoru:  $S=400\text{kVA}$ ;  $u_k=6\%$ ; napěťový součinitel  $c=1,1$ ,  
 dobu trvání zkratu  $t_k$  vypočteme:

$$t_k = \left(\frac{k \cdot S}{I_k''}\right)^2 = \left(\frac{115 \cdot 185}{10584}\right)^2 = 4,04\text{s} \quad (34)$$

kde:

$k$  – teplotní součinitel

$S$  - průřez vodiče v  $\text{mm}^2$

součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu  $k_e=1$ , určeno z tabulek.

Jmenovitý proud kompenzačního rozvaděče

$$I_n = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{100,8}{\sqrt{3} \cdot 400} = 145,49\text{A} \quad (35)$$

Vzhledem k možnému navýšení kompenzace bude v hlavním rozvaděči jištění pro kompenzační rozvaděč pomocí pojistek 315A gG. Je počítáno napájení kompenzačního rozvaděče kabelem CYKY-4x185. Tabulková proudová zatížitelnost vodiče je 374A.

dovolená proudová zatížitelnost:

$$I_{DOV} = I_n \cdot k_1 \cdot k_2 = 374 \cdot 1 \cdot 0,95 = 355,3\text{A} \quad (36)$$

tím je splněna podmínka  $I_{DOV} \geq I_n$

zkratová impedance transformátoru:

$$Z_t = \frac{u_k \cdot U^2}{S} = \frac{0,06 \cdot 400^2}{400 \cdot 10^3} = 0,024\Omega \quad (37)$$

Rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_t} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,024} = 10,584\text{kA} \quad (38)$$

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' = 1 \cdot 10584 = 10,584\text{kA} \quad (39)$$

Kontrola na tepelné účinky zkratových proudů:

$$S_{\min} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\frac{c_0 \cdot (\vartheta_f + 20)}{r_{20}} + \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_l}}} \quad (40)$$

$$= \frac{10584 \cdot \sqrt{5}}{\sqrt{\frac{3,5 \cdot (234,5 + 20)}{0,01786} + \ln \frac{234,5 + 150}{234,5 + 70}}}$$

$$= 105,97 \text{ mm}^2$$

kde

$c_0$  – měrné teplo [kJ/kg.K]

$\vartheta_f$  – fiktivní teplota vodiče [°C]

$\vartheta_l$  – dovolená provozní teplota před zkratem [°C]

$\vartheta_k$  – maximální dovolená teplota [°C]

$\rho_{20}$  – měrný odpor při 20°C [ $\mu\Omega\text{m}$ ]

$S_{\min}$  – minimální průřez vodiče [ $\text{mm}^2$ ]

Z výsledků výpočtu je patrné, že navrhovaný kabel splňuje tepelné účinky zkratových proudů.

Pro připojení kompenzačních baterií vyjdeme z tabulky viz. níže.

Dimenzování vodičů

CYA [ $\text{mm}^2$ ]	$I_{N\max}$ [A]	$Q_{N\max}$ [kvar] 440V
1,5	7,5	5,7
2,5	14,5	11,1
4	18	13,7
6	25	19,1
10	32	24,4
16	48	36,6
25	58	44,2
35	90	68,6

tab. 6-5: dimenzování vodičů

## 6.10 Konstrukce rozvaděče

Rozvaděčové skříně jsou navrženy od firmy Eaton z řady XVTL (oceloplechová skříně). S ohledem na vnitřní prostory je navržený rozvaděč v krytí IP40/00. Rozvaděč není určen laikům, tudíž nepotřebuje vnitřní krytí rozvaděče, které by v tomto případě znamenalo pouze zhoršené chlazení rozvaděče. Velikost rozvaděče je volena s ohledem na dostatečné místo i s rezervou pro případné doplnění. Po prozkoumání již vyrobených

kompenzačních rozvaděčů a z rozměrů jednotlivých komponentů byla stanovena velikost kompenzačního rozvaděče na dvou pólový rozvaděč s velikostí: pole č.1 2000x1000x600(VxŠxH), pole č.2 2000x800x600(VxŠxH). V programu AutoCAD je nakresleno celkové rozmístění přístrojů a zhotoven projekční výkres pro výrobu. Podle rozvržení přístrojů jsou následně vybrány úhelníky, montážní desky a nosníky tak, aby byl rozvaděč mechanicky odolný a konstrukčně srozumitelný. Projektová dokumentace je v příloze.

## 6.11 Oteplení rozvaděče

U každého rozvaděče je potřeba počítat z tepelnými ztrátami. Příčinou ztrát je průchod elektrického proudu, jehož důsledkem je nárůst teploty jednotlivých prvků. Vlivem narůstající teploty prvků přestupuje teplo do rozvaděče a zvyšuje se celková teplota vnitřních prostor rozvaděčové skříně. Je potřebné rozvaděč konstruovat tak, aby při provozu nebyla překročena provozní teplota jednotlivých součástí. Ověření správnosti návrhu se dá provést několika způsoby. Nejspolehlivější způsob ověření je oteplovací zkouška, ale z důvodu obtížné proveditelnosti nebo ekonomické náročnosti můžeme dle normy ČSN 35 7107 místo zkoušky provést odhadované oteplení pomocí výpočtu. Pro usnadnění vypočítání oteplení nám slouží programy jako například: Schrack design, Rittal term, e-config, oteplení rozvaděčů Klimša a další.

Vyjde-li nám ztrátový výkon rozvaděče vyšší než je výkon rozvodnice, který dokáže odebrat je nutné buď zvětšit rozvodnici nebo přidat aktivní chlazení jako například ventilátor nebo je možné přidat i klimatizační jednotku.

Pro kontrolu oteplení rozvaděče popřípadě doplnění rozvaděče chlazením jsem použil program Schrack design a to z důvodu přívětivého uživatelského prostředí. Do programu jsem vložil všechny uvažované komponenty pro výpočet ztrátového výkonu. Výpočet oteplení je zvolen pro maximální teplotu uvnitř rozvaděče 45 stupňů a to z důvodu rychlejšího stárnutí kompenzačních kondenzátorů při dlouhodobě vyšší teplotě než je 45 stupňů celsia.

Výpočet oteplení bez použitého ventilátoru ani v jednu z polí nevyhověl. Zbývající ztrátový výkon potřebný k uchlazení je v 1. poli 181,3W a v 2. poli 351,2W (výstup z programu v příloze). Z programu Schrack design vychází pro uchlazení rozvaděče ventilátor s mřížkou s průtokem vzduchu 256m<sup>3</sup>/h. Ventilátor osadíme do obou polí rozvaděče a tím zaručíme dostatečný odvod tepla.

## 6.12 Cenové zhodnocení

V tabulce níže je uvedena celková cena rozvaděče. Do celkové ceny jsou započítány osazené komponenty, rozvaděčové skříně, ostatní materiál (vodiče, svorky, šrouby, atd.) a montážní práce za zhotovení rozvaděče. Všechny ceny v tabulce jsou již se započítáním DPH. Celková cena rozvaděče činí 167 964 CZK.

RC					
Čís. pol.	Druh materiálu	Jedn.	Množství	Cena za jednotku	Cena celkem
			předeps.		
1	Vypínač 3 pól., 400 A, 25 kA, N3	ks	1	5603	5603
2	Pojistkový odpojovač 3P, 63A, VLCE14-3P	ks	4	497	1988
3	Pojistkový odpojovač 3P, 32A, C10-SLS/32/3	ks	12	217	2604
4	Pojistkový odpojovač 2P, 32A, C10-SLS/32/2	ks	1	169	169
5	Pojistkový odpojovač 1P, 32A, C10-SLS/32/1	ks	4	73	292
6	Pojistka PV14, 50A gG, C22G63	ks	6	41	246
7	Pojistka PV14, 32A gG, C14G32	ks	6	26	156
8	Pojistka PV10, 16A gG, C10G16	ks	12	22	264
9	Pojistka PV10, 10A gG, C10G16	ks	12	22	264
10	Pojistka PV10, 6A gG, C10G6	ks	2	20	40
11	Pojistka PV10, 4A gG, C10G4	ks	4	17	68
12	Stykač kompenzační, 3Z, 25 kVAr, 230V AC, DILK25-11	ks	2	1430	2860
13	Stykač kompenzační, 3Z, 12,5 kVAr, 230V AC, DILK12-11	ks	10	1259	12590
14	Hradící tlumivka 3,15kVAr, 155x92x140	ks	4	1260	5040
15	Hradící tlumivka 6,25kVAr, 155x92x140	ks	4	1550	6200
16	Hradící tlumivka 12,5kVAr, 180x110x160	ks	2	2270	4540
17	Hradící tlumivka 25kVAr, 235x150x160	ks	2	3380	6760
18	Kondenzátor - ZEZ Silko - 3,15kVAr ø85x175	ks	4	590	2360
19	Kondenzátor - ZEZ Silko - 6,25kVAr ø85x175	ks	4	690	2760
20	Kondenzátor - ZEZ Silko - 12,5kVAr ø85x245	ks	2	1040	2080
21	Kondenzátor - ZEZ Silko - 25kVAr ø110x245	ks	2	1410	2820
22	Reg. jalového výkonu BMR - FCR12	ks	1	5560	5560
23	Ventilátor PF43000, krytí IP54, 256 m3/hod	ks	2	3879	7758
24	Mřížka větrací PFA4000, krytí IP54	ks	3	777	2331
25	Termostat pro chlazení FLZ530/1Z	ks	2	357	714
26	Skříň 2000 x 1000 x 600, krytí IP40, dvoukřídle dveře	ks	1	18860	18860
27	Skříň 2000 x 800 x 600, krytí IP40, jednokřídle dveře	ks	1	15108	15108
28	Vnitřní konstrukce (mont. Desky, nosníky,úhelníky...) + bočnice	bal.	1	10638	10638
29	Pasovina Cu 30 x 10 - PEN kompenzace	celk.	2	560,5	1121
30	Ostatní materiál (vodiče, svorky, šrouby,vývodky,...)	celk.	1	11030	11030
	Montážní práce				35140,25
			celková cena:	167964	CZK

tab. 6-6: cena kompenzačního rozvaděče

Pro určení návratnosti investice je spočítána pokuta za nedodržení účinníku.

- Celková měsíční spotřeba elektrické energie je 16 100 kWh.
- Průměrný účinník podniku bez kompenzačního zařízení je  $\cos \varphi=0,68$ .

Z cenového rozhodnutí ERU [4] je stanovena cena za nedodržení účinníku:

$$\begin{aligned}c_p &= (P_{max} \cdot c_{rk} \cdot u) + ((c_{ps} + c_{se}) \cdot u \cdot W) \\c_p &= (0,075 \cdot 177031 \cdot 0,4858) \\&\quad + ((66,79 + 1493,49) \cdot 0,4858 \cdot 16,1) \\&= 18653,67 \text{ Kč}\end{aligned}\tag{41}$$

kde

$c_p$  - cena za nedodržení účinníku (Kč)

$P_{max}$  – nejvyšší naměřený čtvrt hodinový odebraný výkon za vyhodnocovací období (MW)

$c_{rk}$  – cena za rezervovanou kapacitu na příslušné napěťové hladině (Kč/MW)

$u$  – přírážka za nedodržení účinníku

$c_{ps}$  – cena za použití sítí na příslušné napěťové hladině (Kč/MWh)

$c_{se}$  – cena za silovou elektřinu (Kč/MWh)

$W$  – množství elektřiny za vyhodnocovací období (MWh)

Z výsledné částky za nedodržení účinníku vyplývá, že investice do kompenzačního rozvaděče má návratnost již po 9 měsících provozu.



## 7 Závěr

Problematika kompenzace účinníku je v dnešní době velmi aktuální. S růstem cen za elektrickou energii je snaha tyto náklady co nejvíce minimalizovat. Pomocí kompenzace můžeme docílit lepšího využití elektrické sítě. Kompenzované rozvody dimenzujeme na menší procházející proud, čímž ušetříme náklady za vybudování elektrické soustavy a jako koncový odběratel při dodržení předepsaného účinníku nebudeme platit pokuty za nedodržení účinníku.

Ve své práci se zabývám výhradně kompenzací účinníku sítí nízkého napětí. Popisuji fyzikální význam kompenzace, zaměřuji se na popis jednotlivých druhů kompenzačních zařízení a vhodným užitím. A v neposlední řadě se zabývám teoretickým výběrem kompenzačního zařízení a určením jeho výkonu.

V praktické části byl úkol vybrat vhodný objekt, pro který byl navržen kompenzační rozvaděč. Při výběru vhodného objektu jsem došel k závěru, že v mnoha případech není jednoduché centrální kompenzační rozvaděč navrhnout a to z důvodů, že u nových objektů je nutné vyrábět kompenzační rozvaděč dříve, než je objekt v plném provozu. Například u administrativní budovy je těžké zjistit, jaký bude konečný účinník. Z analýzy sítě několika budov, které jsem při výběru vhodného objektu zkoumal, bylo zjištěno, že v dnešní době je u administrativních objektů vlivem LED osvětlení a velkého počtu IT techniky nutné účinník spíše dekompenzovat, než-li kompenzovat.

Z důvodu názorného návrhu jsem si proto vybral průmyslový objekt, pro který byl zhotoven návrh kompenzačního zařízení. Návrh vychází z provedené analýzy sítě na objektu při běžném provozu, kdy je z výsledného měření navrhnout požadovaný kompenzační výkon, druh kompenzačního zařízení. Kompenzační zařízení je navrženo jako centrální stupňovitý rozvaděč s počtem 12 stupňů. Kompenzační stupně jsou konstruovány jako hrazené kondenzátorové baterie. Z výsledků oteplení vychází nutnost chladit rozvaděč ventilátory, aby nestoupla teplota uvnitř nad velikost, kdy by byla ohrožena především životnost kondenzátorů. V poslední části je cenové zhodnocení s počáteční investicí do rozvaděče v hodnotě 167 964 Kč s návratností během 9 měsíců.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KORENC, Vladimír a HOLOUBEK, Jiří. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 1999. 127 s. Elektro; sv. 39. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] KOŠTÁL, Josef. Kompenzace elektrického jalového výkonu. *ELEKTRO* [online]. 2009, (3) [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38682.pdf>
- [3] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: Tiskové středisko ZČU v Plzni. 2000. ISBN 80-7082-703-3.
- [4] Energetický regulační VĚSTNÍK: Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2019. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2019, [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/5228943/ERV8\\_2019.pdf/a5385f13-b36f-487a-8783-6c46cb01a9ca](http://www.eru.cz/documents/10540/5228943/ERV8_2019.pdf/a5385f13-b36f-487a-8783-6c46cb01a9ca)
- [5] Provoz alternátoru [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupný na www: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/798>
- [6] EMG Zlín, s.r.o. *Kompenzace jalové energie* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupný na www: [https://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o\\_kompenzacni.html](https://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o_kompenzacni.html)
- [7] Kompenzační kondenzátory NN. ZEZ SILKO [online]. Žamberk, 2015 [cit. 2019-11-10]. Dostupné na www <https://www.zez-silko.cz/cs/produkty/kompenzacni-kondenzatory-nn>
- [8] PAWLAS, Jaroslav. *Kompenzační filtry pro průmyslové sítě vysokého napětí*. *ELEKTRO* [online]. 2018, (10) [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/kompenzacni-filtry-pro-prumyslove-site-vysokeho-napeti--3225>
- [9] Kompenzace jalového výkonu. PowerWiki [online]. Praha [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: [http://www.powerwiki.cz/attach/EZS/prednaska\\_4a.pdf](http://www.powerwiki.cz/attach/EZS/prednaska_4a.pdf)
- [10] Česká energetika. Regulátory jalového výkonu NOVAR [online]. [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <http://www.ceskaenergetika.cz/download.php?idx=1887>
- [11] PETROV, Georgij Nikolajevič. Elektrické stroje. 1. [díl], Úvod - Transformátory. Překlad Břetislav Benda. 1. vyd. Praha: Academia, 1980. 385 s.
- [12] Current Transformers. Schrack Technik [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: [https://image.schrackcdn.com/katalogseiten/k\\_trbmgen7\\_207-209\\_en.pdf](https://image.schrackcdn.com/katalogseiten/k_trbmgen7_207-209_en.pdf)
- [13] PANKRÁČ, Vítězslav. Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice; Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice (Část 2). *Elektrorevue* [online]. Praha, 2010, 12 (1) [cit. 2020-04-22]. ISSN 1213-1539.

- [14] Index of /data. ZÁVODNÝ ELEKTRO [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://www.zavodny.cz/data/pfcnew.pdf>
- [15] Dimenzování vodičů a jištění kondenzátorů. Navaris [online]. Brno, 2007. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://www.navaris.cz/produkt/produkt-1756574092.pdf>
- [16] HÁLA, Pavel a LACINA, Břetislav. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. 1. vydání. Brno: Elektromanagement, 1994. 90 s. Elektrotechnické příručky; svazek 7.
- [17] HEAVY DUTY, MKP, IP20, 50Hz. ZEZ SILKO [online]. Žamberk [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.zez-silko.cz/cs/produkty/heavy-duty-mkp-ip20-50hz>
- [18] Hradící tlumivky NN. ZEZ SILKO [online]. Žamberk [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.zez-silko.cz/cs/produkty/hradici-tlumivky-nn>
- [19] Přehled průmyslových výrobků. Eaton [online]. Praha [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: [http://www.eatonelektrotechnika.cz/\\_files/upload/content/ca08103003z\\_cz.pdf](http://www.eatonelektrotechnika.cz/_files/upload/content/ca08103003z_cz.pdf)

## **Přílohy**

**Příloha A – projektová dokumentace**

**Příloha B – oteplení rozvaděče**