

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Revitalizace napájení objektu VT Chomutov včetně  
kompenzace 22 kV s dekompenzací 6 kV.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David VÁGNER**  
Osobní číslo: **E15N0045K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Revitalizace napájení průmyslového objektu včetně kompenzace**  
Zadávací 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 :

Revitalizace napájení objektu VT Chomutov včetně kompenzace 22kV s dekompenzací 6kV.

1. Popište teorii kompenzace účinníku, její základní principy a technické možnosti jejího provedení.
2. Popište aktuální produktové řady předních výrobců kompenzačních technologií na trhu.
3. Proveďte praktický návrh revitalizace rozvodu a kompenzace včetně volby zařízení a výpočtu potřebného kompenzačního výkonu.
4. Navrhněte a specifikujte optimální řízení kompenzace s rychlou odezvou.
5. Zhodnoťte přínosy provedené rekonstrukce.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 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. Karel Noháč, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**  
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

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



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

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na provedení návrhu revitalizace napájení průmyslového závodu VT Chomutov. Součástí práce je obecný popis teorie kompenzace účinníku s uvedením základních principů a popsáním technických možností jejího provedení. Pro přední výrobce kompenzačních zařízení jsou uvedeny jejich produktové řady se stručnou charakteristikou komponent. V praktické části této diplomové práce je proveden návrh revitalizace napájecí soustavy včetně teoretického návrhu optimalizace celkového instalovaného výkonu na straně nízkého napětí. V další části je proveden praktický návrh kompenzace včetně volby zařízení a výpočtu potřebného kompenzačního výkonu. V poslední části je popsáno možné dynamické řízení kompenzace a jsou zde zhodnoceny přínosy provedené rekonstrukce.

## **Klíčová slova**

Kompenzace účinníku, filtračně kompenzační zařízení, jalový výkon, činný výkon, zdánlivý výkon, účinník, kondenzátor, tlumivka, filtr.

## **Abstract**

Diploma thesis is describing the proposal of revitalisation of the power supply for the VT Chomutov industrial site. The thesis contains a general description of the theory of power factor compensation while describing basic principles as well as technical possibilities of its implementation. Product lines for the leading manufacturers of compensating devices are presented together with a brief characteristic of respective components. The practical part of thesis is describing revitalisation design of the power supply system for the whole industrial site, including the theoretical proposal for total installed power optimisation on the low voltage side. The next chapter contains a practical proposal of compensation, including the choice of equipment and calculation of the required compensating power. The last part describes the possible dynamic compensation control and also all benefits of the reconstruction are evaluated here.

## **Key words**

Compensation of power factor, filtering and compensating device, reactive power, active power, apparent power, power factor, capacitor, choke, filter.

## **Prohlášení**

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.

.....

podpis

V Plzni dne 14.5.2017

David Vágner

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 KOMPENZACE ÚČINÍKU .....</b>	<b>12</b>
1.1 VÝKONY SOUSTAV .....	12
1.2 NÁVRH KOMPENZACE .....	14
1.3 DRUHY KOMPENZACE .....	14
1.3.1 <i>Individuální kompenzace</i> .....	14
1.3.2 <i>Skupinová kompenzace</i> .....	15
1.3.3 <i>Centrální kompenzace</i> .....	16
1.4 TECHNICKÉ MOŽNOSTI KOMPENZACE.....	16
1.4.1 <i>Statické kondenzátory</i> .....	16
1.4.2 <i>Chráněná kompenzace</i> .....	17
1.4.3 <i>Rotační kompenzační zařízení</i> .....	19
1.4.4 <i>Filtračně kompenzační zařízení</i> .....	19
1.4.5 <i>Aktivní filtry</i> .....	20
1.4.6 <i>Paralelní aktivní filtr</i> .....	20
1.4.7 <i>Sériový aktivní filtr</i> .....	21
1.4.8 <i>Kombinovaný aktivní filtr</i> .....	22
<b>2 PRODUKTOVÉ ŘADY PŘEDNÍCH VÝROBCŮ KOMPENZACÍ NA TRHU.....</b>	<b>23</b>
2.1 EMCOS TEPLICE .....	23
2.1.1 <i>Kompenzační rozváděče NN</i> .....	23
2.1.2 <i>Kompenzační rozváděče VN</i> .....	24
2.2 ZES SILKO .....	25
<b>3 REVITALIZACE A KOMPENZACE OBJEKTU VT CHOMUTOV .....</b>	<b>27</b>
3.1 POPIS VÝCHOZÍ STAVU PŘED NAVRHOVANOU REVITALIZACÍ.....	27
3.2 POPIS NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ .....	27
3.3 NÁVRH REVITALIZACE – KABELOVÉ PROPOJENÍ .....	28
3.4 NÁVRH OPTIMALIZACE INSTALOVANÉHO VÝKONU .....	29



<b>4</b>	<b>NÁVRH CENTRÁLNÍ KOMPENZACE .....</b>	<b>31</b>
4.1	NÁVRH ČINITELE ZATLUMENÍ A TYPU KONDENZÁTORŮ .....	32
4.2	VÝPOČET IMPEDANCE HRADÍCÍ TLUMIVKY .....	33
<b>5</b>	<b>NÁVRH FILTRAČNĚ KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>ŘÍZENÍ KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>38</b>
6.1	ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA REGULÁTORU .....	39
6.2	PŘÍNOSY NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ .....	40
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>41</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>43</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Seznam použitých symbolů

C	kondenzátor
$\cos \varphi$	účinník
D	deformační výkon
f	frekvence
$I_{\Delta S}$	síťový proud v zapojení do trojúhelníku
$I_Y$	síťový proud v zapojení do hvězdy
$I_{Yf}$	fázový proud v zapojení do hvězdy
p	činitel ztlumení
L	indukčnost
P	činný výkon
$P_Z$	ztrátový výkon kondenzátoru
Q	jalový výkon
$Q_{CF}$	kompensační výkon pro 1 fázi
$Q_C$	kompensační výkon pro 3 fáze
R	rezistor
S	zdánlivý výkon
$\text{tg } \delta$	ztrátový činitel
$U_F$	fázové napětí
$U_S$	sdržené napětí
$X_C$	kapacitní reaktance
$X_L$	induktivní reaktance
Z	impedance
$\beta$	koeficient soudobosti zátěže
$\varphi$	fázový posuv
$\varphi_u$	fázový posuv napětí
$\varphi_i$	fázový posuv proudu
$\lambda$	power factor
$\omega$	úhlová rychlost

## Úvod

Elektrické spotřebiče induktivního charakteru připojené k elektrické síti potřebují z fyzikálního hlediska pro svoji činnost mimo jiné i jalovou energii. Ta, ale jak je patrné již z názvu, nevykoná činnou práci, a navíc zatěžuje rozvodnou soustavu (nadměrné zahřívání vedení, tepelné ztráty). Tento jev lze vyrovnávat (kompenzovat) připojením opačně orientovaného prvku, než je indukčnost, to znamená kondenzátorem.

Dalším nezanedbatelným důvodem, proč kompenzovat je ekonomické hledisko. V případě, že odběratelé elektrické energie nedodrží předepsaný účinník  $\cos \varphi$  v takzvaném neutrálním pásmu předepsaném distributorem elektrické energie ( $\cos \varphi$  v rozmezí 0,95 až 1), jsou penalizovány dle zákona, nemalými finančními částkami. Dalším faktorem je že vlivem tepelného odlehčení a nižších ztrát ve vedení lze použít menší průřezy vodičů (nižší pořizovací náklady vodičů, efektivnější využití rozvodné soustavy).

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na provedení návrhu revitalizace napájení průmyslového závodu VT Chomutov.

Text je rozdělen do sedmi kapitol. V první kapitole je proveden obecný popis teorie kompenzace účinníku s uvedením základních principů a popsáním technických možností jejího provedení. Druhá kapitola je věnována předním výrobcům kompenzačních zařízení a jsou zde uvedeny jejich základní produktové řady se stručnou charakteristikou komponent. Ve třetí kapitole je popsán návrh revitalizace napájecí soustavy s návrhem optimalizace celkového instalovaného výkonu. Čtvrtá a pátá kapitola je věnována praktickému návrhu kompenzačního zařízení. Kde v jedné části je provede výpočet a návrh centrální hrazené kompenzace a ve druhé části je popsána realizace filtračně kompenzačního zařízení. V šesté kapitole je popsáno možné dynamické řízení kompenzace a v poslední kapitole jsou zhodnoceny přínosy provedené rekonstrukce.

# 1 Kompenzace účinníku

Kompenzace účinníku patří mezi základní prostředky ke snížení ztrát odebírané energie. Každý odběratel musí provádět kompenzaci svého odběru tak aby nebyl postižen přírůžkou k ceně elektrické energie dodavatelem. Na činných ztrátách se podílí i jalová složka proudu. Hlavním úkolem kompenzace účinníku je tedy minimalizovat jalovou složku proudu se snížením jejich ztrát.

## 1.1 Výkony soustav

**Činný výkon** koná užitečnou práci. V elektrických spotřebičích se mění na jiný druh energie. U elektrických motorů vytváří moment na hřídeli, u přímotopů se mění na teplo nebo u žárovek na světlo. U činného výkonu je proud a napětí ve fázi a je dán vztahem:

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

**Jalový výkon** nekoná užitečnou práci. Jalový výkon je střídavou složkou okamžitého výkonu a jeho střední hodnota se rovná nule (nabývá kladných a záporných hodnot). Tento výkon je nezbytně nutný pro spotřebiče pracující s magnetickým polem (synchronní a asynchronní motory, transformátory atd..). Přenos jalového výkonu vedením způsobuje Jouleovy ztráty a úbytky napětí v důsledku jeho kmitání mezi zdrojem a spotřebičem. Z těchto důvodů je potřeba tento výkon vykompenzovat.

U jalového výkonu je proud fázově posunut oproti napětí. U induktoru předbíhá napětí proud o  $90^\circ$  a u kapacitoru se napětí zpožďuje za proudem o  $90^\circ$ . Jalový výkon je dán vztahem:

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

**Zdánlivý výkon** je pouze fiktivní. Podle zdánlivého výkonu se provádí výkonové dimenzování rozvodných zařízení (vedení, transformátory, přípojnice atd..) a je dán vztahem:

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

Induktivní charakter:

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (-)$$

$$\bar{S} = \bar{U} \cdot \bar{I}^* \quad (VA)$$

Kapacitní charakter:

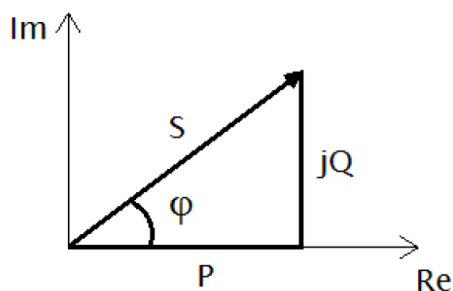
$$\varphi = \varphi_i - \varphi_u \quad (-)$$

$$\bar{S} = \bar{U}^* \cdot \bar{I} \quad (VA)$$

**Deformační výkon** představuje stejně jako jalový výkon neúčinnou složku. Tento výkon se vyskytuje v neharmonických obvodech (výskyt harmonických složek proud a napětí) a vyvolává ztráty v síti a snižuje její zatížitelnost. Deformační výkon je dán vztahem:

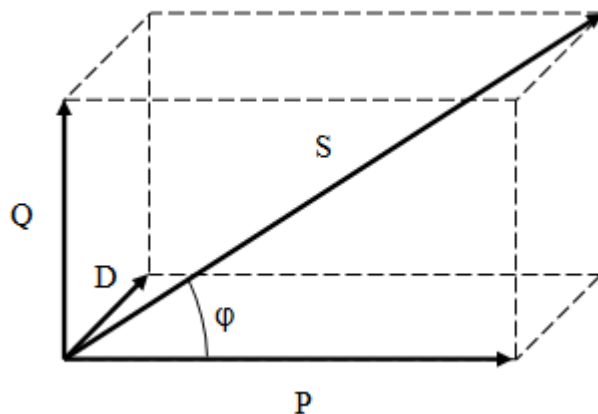
$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (-)$$

V harmonických obvodech můžeme zobrazit výkony pomocí trojúhelníku výkonů.



Obrázek 1.1 – Výkony v harmonických obvodech.

V neharmonických obvodech zobrazujeme výkony v takzvaném kvádru výkonů.



Obrázek 1.2 – Výkony v neharmonických obvodech.

**Účinník  $\cos\varphi$**  je bezrozměrná veličina, která je dána poměrem činného a jalového výkonu. Účinník nabývá pouze kladných hodnot v rozmezí od 0 do 1. Kapacitní a induktivní zátěž se rozlišuje uvedením v závorce (např.  $\cos = 0,8$  (ind.)). Obvody s čistě odporovou zátěží mají fázový posuv nula ( $\cos \varphi = 1$ ,  $Q = 0$ ). Toto je v praxi ideální stav, ke kterému se snažíme pomocí kompenzace jalového výkonu co nejvíce přiblížit. Tyto výše uvedené poznatky platí pouze v harmonických obvodech.

V neharmonických obvodech musíme již zohlednit vlivy vyšších harmonických proudů a napětí a definici účinníku jako  $\cos \varphi$  nelze uplatnit. V některé literatuře proto  $\cos \varphi$  nese označení  $\lambda$  takzvaný power factor (skutečný účinník), který je dán definicí:

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

## 1.2 Návrh kompenzace

Je nutno stanovit potřebný kompenzační výkon. Pokud známe činný výkon spotřebiče, jeho účinník a hodnotu účinníku, který je požadován po kompenzaci, tak pro jednu fázi platí:

$$Q_{CF} = U_F \cdot I_C = P_F (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K) \quad (VAR)$$

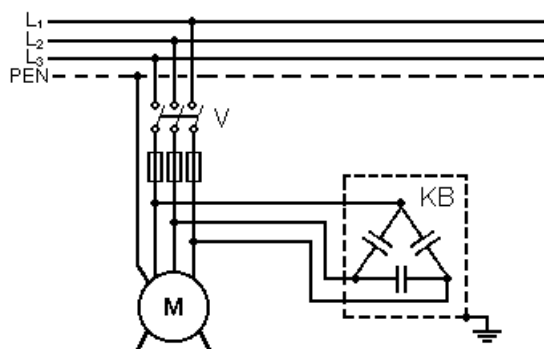
Pro tři fáze platí:

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_C = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K) \quad (VAR)$$

## 1.3 Druhy kompenzace

### 1.3.1 Individuální kompenzace

Při volbě tohoto druhu kompenzace je kompenzační prvek umístěn přímo u spotřebiče. Pro každý spotřebič se zvolí vhodně dimenzovaný kondenzátor.

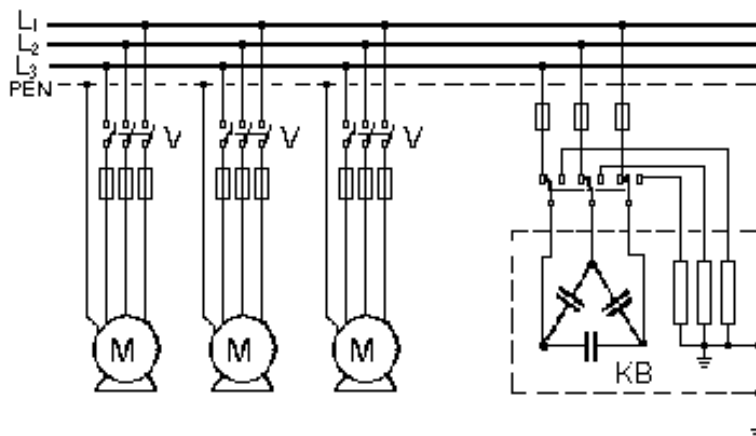


Obrázek 1.3 – Individuální kompenzace

Mezi hlavní výhody tohoto druhu kompenzace je jednodušší realizace a spolehlivější provoz než ostatní níže popisované způsoby (není potřeba samostatně spínat kondenzátory). Nevznikají spínací přepětí. Na druhou stranu hrozí nebezpečí překompenzování u spotřebičů s proměnlivou zátěží. Při umístění kondenzačních prvků k jednotlivým spotřebičům se rozšiřuje náročnost na prostorovou zástavbu a možnost pravidelné údržby je také obtížnější vzhledem k rozptýlení jednotlivých kompenzačních členů po prostoru průmyslového objektu. Vzhledem k těmto skutečnostem se individuální kompenzace používá zejména pro málo zatížené a krátkodobě, ale často spouštěné asynchronní motory se špatným účínkem. Dále se s individuální kompenzací můžeme setkat u světelné techniky, zejména zářivkových svítidel. Tímto typem kompenzace můžeme snížit dimenzování individuálních spotřebičů (zejména motorů). [2,3]

### 1.3.2 Skupinová kompenzace

Při použití skupinové kompenzace se kompenzační baterie připojují na přípojnice rozváděče, z něhož jsou napájeny skupiny spotřebičů. Velikost kondenzátorových baterií je navržena na kompenzaci soudobého odebíraného výkonu. V praxi se často skupinový rozváděč doplnění jištěným vývodem pro napájení samostatného kompenzačního rozváděče.



Obrázek 1.4 – Skupinová kompenzace

Při tomto způsobu kompenzace se docílí lepšího využití kondenzátorových baterií. Na druhou stranu je potřeba jistit a spínat jednotlivé kondenzátorové baterie a provádět automatickou regulaci velikosti kompenzačního výkonu. Skupinová kompenzace se nejčastěji používá v rozvodech nízkého napětí a pro skupiny spotřebičů s nízkým časovým využitím. [2,3]

### 1.3.3 Centrální kompenzace

Celkový kompenzační výkon je umístěn centrálně pro celý průmyslový závod připojením kondenzátorových baterií na přípojnice vstupní rozvodny nebo hlavního rozváděče. Velikost kompenzačního výkonu se reguluje automaticky pomocí regulátorů jalového výkonu.

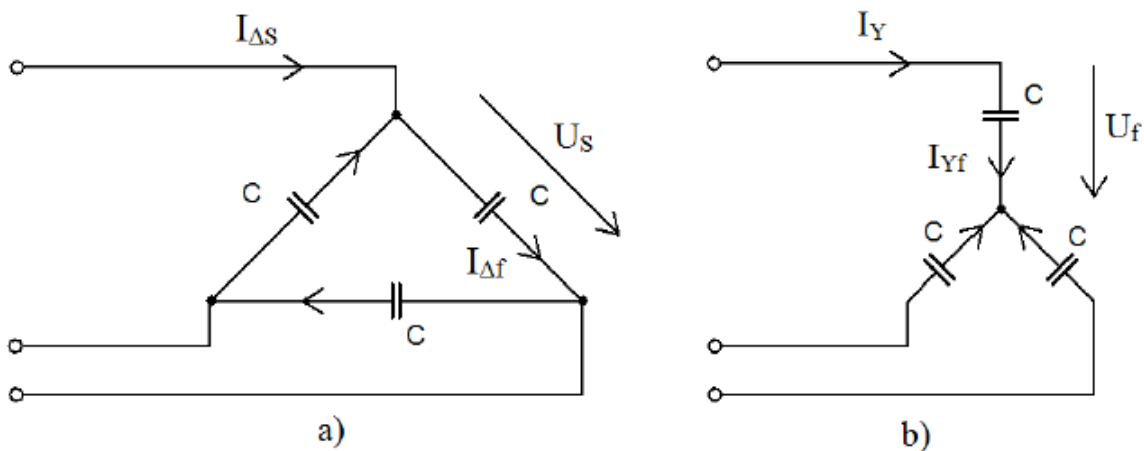
## 1.4 Technické možnosti kompenzace

### 1.4.1 Statické kondenzátory

Statické kondenzátory se používají jako kompenzační prvky jalového výkonu induktivního charakteru. Od kondenzátoru, který je určen pro kompenzační účely, požadujeme hlavně tepelnou stabilitu, odolnost proti přepětí, spolehlivost a bezpečnost.

Jednotlivé kondenzátory nebo baterie kondenzátorů jsou připojovány nebo odpojovány stykači nebo vypínači ke kompenzovanému zařízení. Toto spínání je prováděno dle okamžité velikosti jalového výkonu. Spínání je řízeno regulátorem jalového výkonu. [3]

Na níže položeném obrázku jsou znázorněny dva základní způsoby zapojení kondenzátorových baterií.



Obrázek 1.5 – a) zapojení do trojúhelníka, b) zapojení do hvězdy

Zapojení do hvězdy volíme zpravidla pro vysoká napětí, kde fázové napětí a proud procházející kondenzátorem je třetinový oproti zapojení do trojúhelníka. Nevýhodou může být nižší kompenzační výkon který je v případě zapojení do hvězdy o třetinu menší než v zapojení do trojúhelníku.



Ovlivňujícím faktorem kvality kondenzátorů jsou ztráty, a to zejména ztráty v dielektriku. V případě sinusového napájení je platný tento vztah:

$$P_Z = Q_C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (W)$$

Pro neharmonický průběh platí tento vztah:

$$P_Z = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot Q_n \cdot \operatorname{tg} \delta_n \quad (W)$$

Kde je:  $n$  - řád harmonické

Další významnou vlastností kondenzátorů je jejich frekvenční závislost impedance, která je dána vztahem:

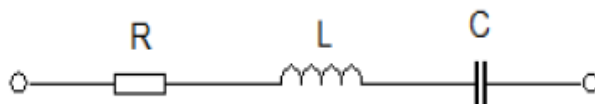
$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (\Omega)$$

Podle tohoto vztahu můžeme konstatovat, že se zvyšujícím se kmitočtem klesá reaktance. Připojíme-li samostatný kondenzátor do sítě, kde budou i zdroje harmonických proudů, bude pro ně kondenzátor představovat nízkou impedanci. Celková efektivní hodnota proudu protékajícího kondenzátorem vzroste a tento proud bude přetěžovat jak kondenzátor, tak i část sítě mezi kondenzátorem a zdrojem harmonických. Jejich využití je tedy zvláště v sítích nízkého a vysokého napětí s malými úrovněmi energetického rušení (instalovaný výkon nelineárních spotřebičů nepřesahuje 10 až 15 % celkového instalovaného výkonu).

Mezi hlavní výhody použití kondenzátorů patří jejich cena a možnost ochrany přechodných jevů pomocí speciálních reaktorů. [1]

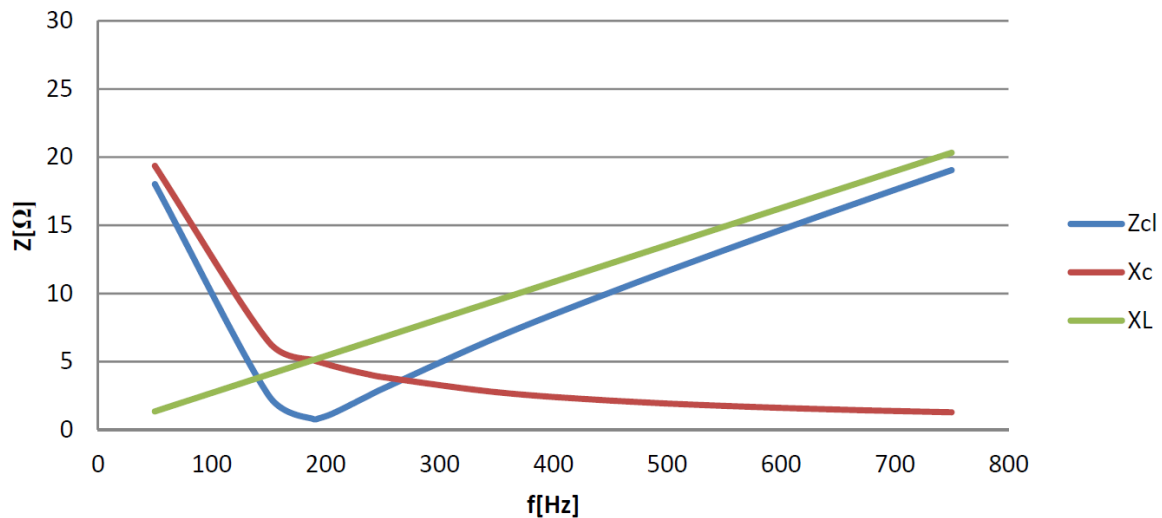
#### 1.4.2 Chráněná kompenzace

Chráněná kompenzace je v podstatě jednoduchý sériový rezonanční obvod, ve kterém jsou v sérii zapojeny RLC prvky.



Obrázek 1.6 RLC článek

Kompence účinníku s chráněnou kompenzací je metoda odstraňující nebezpečí vzniku rezonančního stavu pomocí posunu rezonanční frekvence na nižší hodnoty, kde se nenachází žádný harmonický proud. Toho se dosáhne tak, že se ke kondenzátorům zapojí filtrační tlumivka. Vzniklý obvod je sice nadále rezonanční, avšak jeho rezonanční frekvence je pod první existující harmonickou (zatlumena). Tak je zajištěno, že nevznikne skutečný rezonanční stav.



Obrázek 1.7 Impedanční závislost RLC obvodu na frekvenci.

Ladicí frekvence je vyjádřena činitelem zatlumení (detuning factor  $p$ ), který se vypočte podle vztahu:

$$p = \left( \frac{f_1}{f_r} \right)^2 \cdot 100 \quad (\%)$$

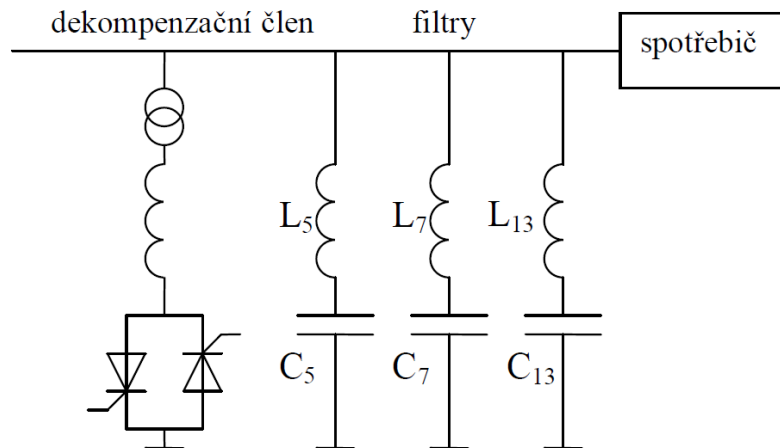
Kde  $f_1$  je frekvence základní harmonické 50 Hz a  $f_r$  je rezonanční frekvence RLC obvodu. Nejčastěji používané rezonanční frekvence jsou 134 Hz (s činitelem zatlumení 14 %), 189 Hz (s činitelem zatlumení 7 %) a 177 Hz (s činitelem zatlumení 8 %).

### 1.4.3 Rotační kompenzační zařízení

Synchronní kompenzátor je synchronní motor pracující bez mechanického zatížení. Změnou jeho buzení je možné v dostatečném rozpětí měnit spotřebu či dodávku jalové energie. V přebuzeném stavu představuje synchronní motor zdroj indukční jalové energie. Synchronní kompenzátory jsou především používány v přenosových a rozvodných sítích vn a vvn jako prostředek pro kompenzaci jalových výkonů, k regulaci napětí a udržení stability sítě. Do sítě jsou zapojovány prostřednictvím transformátoru se třemi vinutími. Oproti kondenzátorům se u synchronních kompenzátorů při poklesu napětí zvyšuje odebíraný kapacitní jalový výkon, tím se zmenšuje úbytek napětí v síti a napětí se udržuje. V rozsáhlejších průmyslových sítích rotační kompenzátory plní funkci centrální kompenzace na hlavní vstupní rozvodně. Jmenovité napětí synchronních kompenzátorů je obvykle 6 kV a k rozvodnám o vyšším napětí jsou připojovány přes transformátor. Jmenovité výkony synchronních kompenzátorů používaných v průmyslových závodech jsou v rozmezí 5 až 15 MVar. Výhodou je možnost plynulé regulace kompenzovaného výkonu. S ohledem na jejich dobu reakce jsou vhodné ke kompenzaci průmyslových sítí, jejichž odběr jalového výkonu je víceméně stabilní nebo se mění bez dynamických rázů. V ostatních případech může docházet ke krátkodobému nedokompenzování nebo překompenzování, čímž se může ještě více zvýšit úroveň kolísání napětí. Synchronní kompenzátory nepotlačují ani nezvýrazňují harmonické zkreslení napětí, nejsou ani zdrojem ani filtrem vyšších harmonických. Z těchto důvodů nejsou vhodné pro kompenzaci elektrických obloukových pecí. S ohledem na provozní náklady jsou postupně v průmyslových sítích nahrazovány statickými kompenzačními prostředky. [3]

### 1.4.4 Filtračně kompenzační zařízení

Filtračně kompenzační zařízení představuje v současné době technicky nejdokonalejší kompenzační prostředek. Obvod je v podstatě tvořen několika sériovými LC obvody, z nichž je každý obvod vyladěn na některou vyšší harmonickou (zpravidla třetí, pátá, sedmá, jedenáctá a třináctá harmonická). K tomuto obvodu je paralelně připojena dekompenzační tlumivka. Obvod je navržen tak, že dochází k trvalému překompenzování a pomocí řízené spínání dekompenzačního členu (tlumivky) dochází k vykompenzování zařízení na požadovaný účinník).



Obrázek 1.8 Způsob zapojení FKZ

Tato filtračně kompenzační zařízení umožňují dynamickou kompenzaci jalového výkonu s možností filtrace vyšších harmonických. Své využití nachází v těžkém průmyslu, kde je proměnlivá zátěž (například tažné a válcovací stolice). [2,3]

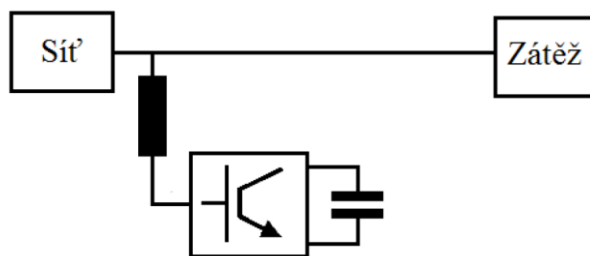
#### 1.4.5 Aktivní filtry

Základem aktivního filtru je generátor, který vyrábí inverzi zbytkové křivky neboli působí proti harmonickým složkám napětí a proudu. Tímto působením dochází k vyhlazení sinusové složky základního kmitočtu. Aktivní filtry dělíme dle jejich způsobu připojení na aktivní filtry paralelní, sériové nebo kombinované.

#### 1.4.6 Paralelní aktivní filtr

Tento filtr je tvořen řízeným generátorem proudu zapojeným paralelně k zátěži. Generování shodné složky opačného směru se zavedením do sítě dochází k odstranění nežádoucího harmonického proudu. Tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě a upravují se napěťové deformace způsobené zátěží. Generováním jalové složky první harmonické proudu dochází k velmi rychlé kompenzaci. Nebo pomocí sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou.

Paralelní aktivní filtr je tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů (IGBT tranzistorů). V praxi se nejčastěji využívá typ s napěťovým zdrojem tvořeným kondenzátory. Vhodným spínáním těchto tranzistorů lze dosáhnout požadovaného tvaru proudu tekoucího do filtru. Vzhledem k výskytu většího množství harmonických v oblasti spínacích kmitočtů je zařízení doplněno o pasivní filtr pracující jako dolní propust'. [1]

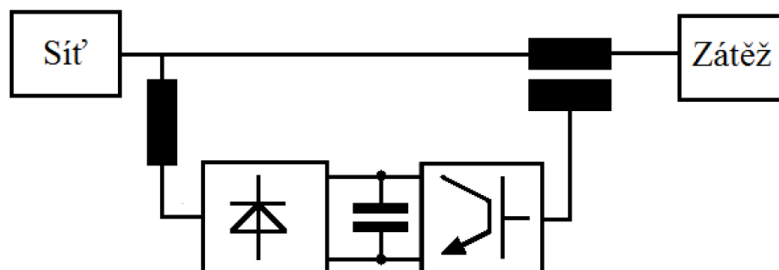


Obrázek 1.9 Paralelní aktivní filtr

Paralelní aktivní filtr upravuje vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji, jinak řečeno vyrovnává rušivé účinky zátěže.

#### 1.4.7 Sériový aktivní filtr

Tento typ filtru upravuje napětí. Filtr je zapojen mezi sítí a spotřebičem a upravuje přiváděné napětí na požadovaný tvar. Tento druh zapojení filtru má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy nebo špičky, odstraňovat harmonické a zajišťovat symetrické rozložení napětí.

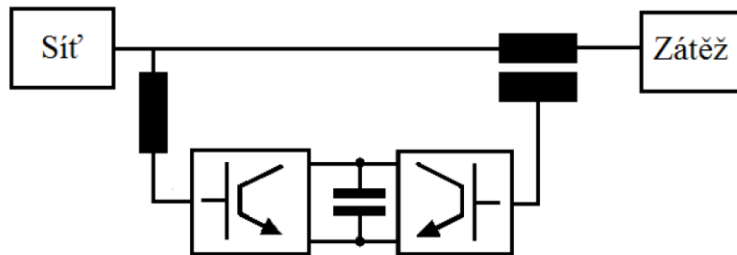


Obrázek 1.10 Sériový aktivní filtr

Sériový aktivní filtr upravuje síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči (dodávají zátěži kvalitnější energii).

### 1.4.8 Kombinovaný aktivní filtr

Paralelní a sériové zapojení lze kombinovat do jednoho celku, takzvaného kombinovaného aktivního filtru. Tímto způsobem docílíme všech výhod obou způsobů. To znamená zajištění vhodného průběhu napětí v místě připojení filtru, tak zároveň definovaný odebíraný průběh proudu.



*Obrázek 1.11 Kombinovaný aktivní filtr*

Hlavní využití těchto filtrů je u takzvaných kondicionérů větších výkonů, kde v kombinaci s vyšší kapacitou akumulované energie výrazně méně ovlivňují síť směrem ke zdroji elektrické energie.

## 2 Produktové řady předních výrobců kompenzací na trhu.

### 2.1 Emcos Teplice

Společnost EMCOS s.r.o. patří k tradičním výrobcům typových kompenzačních rozváděčů. Nabídka kompenzačních rozváděčů obsahuje v současné době téměř 250 konstrukčně zpracovaných a vyráběných typů.

#### 2.1.1 Kompenzační rozváděče NN

**Klasické stykačové kompenzátory** - kondenzátor je na síť připínán pomocí speciálního stykače. Přechodový děj je částečně zatlumen předřadným odporem, který je při spínání zařazen do silového obvodu. Výhodou jsou malé ztráty a příznivé cenové relace. Nevýhodou je možnost přetížení a případné zvýšení harmonických složek v sítích s jejich výskytem.

**Hrazené (chráněné) kompenzátory** - jednotlivé stupně jsou tvořeny sériovým LC obvodem, standardně laděným na 189Hz ( $p = 7\%$ ) a spínaným speciálním stykačem. Kondenzátor je tak chráněn proti přetížení, nedochází ke zvýšení obsahu harmonických v síti a jsou vyloučeny nebezpečné rezonance. Harmonické složky jsou potlačeny, nejsou však zcela odstraněny. Kompenzátory možno dodat též s činitelem zacívkování LC obvodu  $p = 5,67\%$  nebo  $p = 14\%$ .

**Bezkontaktní hrazené (chráněné) kompenzační zařízení** - kompenzační baterie jsou spínány pomocí tyristorových spínačů bez rušivých přechodových jevů. Rychlost regulace speciálním regulátorem EFR7 je velmi vysoká a díky vložené tlumivce si zachovává hradící vlastnosti hrazené kompenzace. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady, které jsou však vyváženy provozní spolehlivostí.

**Dekompenzátory** - jednotlivé stupně jsou tvořeny stykačově připínanými dekompenzačními tlumivkami, regulace řešena speciálním regulátorem vyhodnocujícím výstupní impulsy vysílacího elektroměru. Vhodné pro dekompenzaci kapacitního výkonu při provozu fotovoltaických elektráren a rozsáhlých kabelových sítí.

**Filtračně kompenzační zařízení** - používají se k odfiltrování harmonických frekvencí. Jednotlivé LC obvody jsou laděny na příslušné frekvence (obvykle liché násobky základní harmonické) a vyšší harmonické jsou tak odsávány. Kompenzační účinek je dosažen

převažující kapacitní složkou impedance filtru, regulaci účinníku lze zajistit např. řízením proudu dekompenzační tlumivkou.

### **2.1.2 Kompenzační rozváděče VN**

**Neřízené kompenzátory 6 kV** - rozváděče jsou určeny pro individuální nebo skupinovou neřízenou kompenzaci v sítích vysokého napětí 6,3 kV. Zařízení obsahuje trojici pojistkových spodků, vzduchovou tlumivku pro omezení přechodných dějů není použita ochrana proti harmonickým složkám. Kondenzátor s ekologicky nezávadným biologicky odbouratelným impregnantem, vnitřními pojistkami svítků a vnitřními vybíjecími odpory je možno vybavit kontrolním tlakovým čidlem. Výkon je obvykle navržen na základě měření nebo výpočtu parametrů spotřebiče.

**Řízené kompenzátory 6 kV** - kondenzátory jsou na síť připínány pomocí speciálních stykačů s vysokou životností. Přechodný děj je částečně ztlumen vzduchovým reaktorem, zařazeným do silového obvodu, není použita ochrana proti harmonickým složkám. Spínání je řízeno vlastním regulátorem nebo nadřazeným řídicím systémem. Pro zvýšení rychlosti regulace je možno instalovat rychlovybíjecí zařízení. Kompenzační rozváděč může být vybaven poruchovým systémem (tlak v nádobě kondenzátorů, teplota, výpadek pojistky atd.). Kompenzační výkon jednoho stupně je od 50 kVAr až do 600 kVAr. Celkový výkon a velikost regulačních stupňů je vhodné individuálně navrhnout na základě měření rozvodné soustavy.

**Řízené hrazené (chráněné) kompenzátory 6 kV** – jednotlivé stupně jsou tvořeny výkonovými sériovými LC obvody, laděnými na požadovanou frekvenci. Spínání je stykačové, kondenzátor je zde chráněn proti přetížení, nedochází ke zvýšení obsahu harmonických složek v síti a jsou vyloučeny nebezpečné rezonance. Rezonanční kmitočet je doporučeno ověřit důkladnou analýzou rozvodné soustavy. Výkonové železové tlumivky jsou dostatečně dimenzovány a zaručují tak odolnost proti proudovému přetížení spolu s vysokou linearitou. Kompenzační rozváděče jsou vybaveny poruchovým systémem, který monitoruje tlak v nádobě kondenzátorů, teplotu tlumivek, stav pojistek a další provozní parametry. Regulátor je určen pro VN aplikace, spolupracuje s monitorovacím systémem a může být vybaven komunikační sběrníci. Celkový výkon a velikost regulačních stupňů, včetně rezonančního kmitočtu se vždy individuálně navrhuje na základě analýzy rozvodné soustavy.



## 2.2 ZES Silko

Společnost ZEZ SILKO, s.r.o. je předním výrobcem výkonových kondenzátorů, kompenzačních a filtračně kompenzačních zařízení nn a vn v České republice. Zajišťuje komplexní služby související s kompenzací účinníku. Nabízí změření parametrů v síti, zpracování projektů, výrobu a uvedení zařízení do provozu. Dodává rovněž komponenty potřebné pro zajištění požadovaného účinníku, pro měření a regulaci elektrické energie.

**Kondenzátory nízkého napětí** – jsou určeny pro kompenzaci a filtraci vyšších harmonických. Kondenzátory jsou vyráběny v systémech MKP (metalizované polypropylénové fólie). Oba dielektrické systémy jsou samohojivé. Pokovená vrstva je v případě napětového průrazu odpařena. Vzniklá izolační plocha je velmi malá a nemá vliv na funkci kondenzátoru. Svitky kondenzátoru jsou vloženy do hliníkové nádoby. Nádoba kondenzátoru je chráněna proti roztržení přetlakovým odpojovačem, který zajistí bezpečné odpojení kondenzátoru od sítě při přetížení nebo na konci vlastní životnosti. Kondenzátory jsou vybaveny třemi vybíjecími rezistory.

Mezní hodnoty:

- Napětí: 230–1000 V AC
- Kmitočet: 50 / 60 Hz
- Výkon: do 100 kVAr

**Kondenzátory vysokého napětí** – kondenzátory jsou určeny pro kompenzaci jalového výkonu a pro filtraci vyšších harmonických. Konstrukce dielektrika je v provedení all–film (celofóliové). Dielektrikem je polypropylenová fólie impregnovaná syntetickou kapalinou, známou pod obchodním názvem JARYLEC, která je zdravotně i ekologicky nezávadná. Elektrody tvoří hliníková fólie. Tato konstrukce zajišťuje velmi nízké ztráty kondenzátorů. Zapojení aktivní části je u třífázových jednotek do hvězdy a značí se „Y”, u jednofázových se značí „I”. Jednotky mají vestavěny vnitřní vybíjecí odpory snižující napětí na 75 V do 10 minut. Třífázové i jednofázové jednotky jsou v plně izolovaných nádobách.

Mezní hodnoty:

- Napětí: do 24 kV AC
- Kmitočet: 50/60 Hz
- Výkon: do 1000 kVAr

**Kompenzační rozváděče nn** – kondenzátorové kompenzační rozváděče typu QR slouží v průmyslových rozvodech nízkého napětí ke kompenzaci jalového výkonu elektrických

spotřebičů induktivního charakteru. Kompenzační rozváděče jsou konstruovány v oceloplechových skříních (u nižších výkonových řad skříně určené k pověšení na svislou konstrukci). Rozváděče jsou vybaveny automatickým regulátorem a stykači s odporovým spínáním.

Standardní výkonové řady:

- QRC 4,5–35 kVAr (nástěnné)
- QRN 10–87,5 kVAr (nástěnné)
- QRS 75–150 kVAr (nástěnné)
- QRV 110–400 kVAr (standardní)
- QRG 300–1200 kVAr (standardní)
- QRF 60–920 kVAr (hrazené)
- QRR 60–1260 kVAr (s rychlým spínáním)

**Kompenzační rozváděče vn** - rozváděče výrobního označení typu SCB nebo ACB jsou kompaktní kompenzační rozváděče vnitřního provedení (IP dle přání zákazníka), určené pro síť ve jmenovitém napětí nad 1 kV. Slouží k individuální nebo skupinové kompenzaci účinníku v těch případech, kdy kompenzovaná síť je zanedbatelnou měrou ovlivněna harmonickými generovanými rušivými spotřebiči (na vyžádání je možno vyrobit provedení s ochrannými hradíci tlumivkami). Vhodné spotřebiče jejichž účinník může být pomocí rozváděče ve standardním provedení kompenzován, jsou např. asynchronní motory, transformátory atd.

Mezní hodnoty: Napětí: do 22 kV AC

Kmitočet: 50/60 Hz

Výkon: do 10 MVar

## 3 Revitalizace a kompenzace objektu VT Chomutov

### 3.1 Popis výchozí stavu před navrhovanou revitalizací

Elektrické napájení technologie výroby je provedeno částečně z rozvodny ASSEL (R22.4), která je ve vlastnictví společnosti Válcovny trub Chomutov. Další části technologie jsou napájeny z rozvodu společnosti ACTHERM (zejména R22.1), která se etablovala jako provozovatel rozvodu a dodavatel energie pro Válcovny trub Chomutov. Rozvodna ASSEL je napájena ze strany distributora elektrické energie na úrovni 22 kV. V rozvodně ASSEL jsou k dispozici tři transformátory 22/6 kV, 6300 kVA. V provozu jsou pouze dva transformátory se střídavým provozem. Třetí transformátor je z provozu odstaven. Vývody všech tří transformátorů jsou zakončeny v rozvodně ASSEL 6 kV (R6.9). V rozvodně ASSEL jsou rovněž instalovány transformátory 6/0,4 kV a 6/0,5 kV.

Ze třech kompenzačních filtrů v rozvodně ASSEL na napěťové úrovni 22 kV jsou z ekologických důvodů demontovány kondenzátory, a tudíž filtry jsou nefunkční. V kompenzacích na napěťových hladinách 400 V a 500 V jsou rovněž ze stejného důvodu demontovány kondenzátory a kompenzace je také nefunkční.

### 3.2 Popis navrhovaného řešení

Předkládaný návrh plně řeší záměr společnosti Válcovny trub Chomutov zajistit elektrické napájení provozu z jednoho odběrného místa (vůči distributorovi elektrické energie) a zabránit penalizaci ze strany distributora elektrické energie za zpětné vlivy na kvalitu elektrické energie (účinník  $\cos \varphi$  a vliv harmonických). V budoucnu předpokládá nevyužívat nadále rozvodny společnosti ACTHERM. V rámci této etapy bude ale rozvodna ACTHERM dočasně využívána formou pronájmu.

Revitalizace rozvodů je rozdělena do dvou etap. V první etapě je řešena rekonstrukce kompenzace a připojení velkých spotřebičů, včetně kritického motoru děrováku na nový, kompenzovaný rozvod energie. Výhodou tohoto řešení je vykompenzování jalového výkonu na nastavenou úroveň  $\cos \varphi$  s velmi rychlou odezvou na změnu jalového výkonu (v podstatě vždy do příští periody střídavého napětí). Tím jsou zcela eliminovány penalizace za nevykompenzování.

Ve druhé etapě (plánované) bude dodána 6 kV rozvodna a instalována zřejmě do prostoru čerpadel. Tato rozvodna bude připojena na kompenzovaný rozvod energie. Spotřebiče technologie budou přepojeny do této rozvodny (zejména motor děrováku a motory čerpadel).

### 3.3 Návrh revitalizace – kabelové propojení

Navrhuji provést kabelový propoj mezi rozvodnou ASSEL (R22.4) a rozvodnou ACTHERM (R22.1). Tímto krokem reflektuji požadavek zákazníka odebírat energii pouze na hladině 22 kV. Kabelový propoj bude proveden s využitím stávajícího kabelu A22009, směřujícího z rozvodny ASSEL R22.4 směrem k rozvodně SANDVIK. Kabel je párový (2x3x240 mm<sup>2</sup>), z R22.4 vede kabel kabelovým kolektorem pod R22.1 do R22.3 firmy Sandvik. Kabel se musí rozdělit na samostatné kabely.

Na straně rozvodny firmy Sandvik R22.3 v kobce č.2 se kabely oddělí od sebe. Funkční kabel zůstane beze změn a druhý kabel se zatáhne do kabelového prostoru a zajistí se proti vytečení kabelového oleje z dolévacích koncovek.

Na R22.4, kobka č.4 se kabely oddělí od sebe, funkční kabel zůstane beze změn a druhý kabel se musí připojit do kobky č.5. Tato kobka bude repasována a bude vybavena novými odpojovači, vypínačem, proudovými a napěťovými měniči, a to vše dimenzováno na požadovaný přenášený výkon. Součástí rekonstrukce kobky bude také návrh nové ochrany.

Na R22.1 jeden kabel z páru zůstane beze změn a druhý se přeručí. Přeručení kabel mezi R22.1 a R22.3 se uzavře – zaletuje z možnosti případného dalšího použití a úniku kabelového oleje.

Přeručení kabel mezi R22.1 a R22.4 se na R22.1 naspojkuje na nový kabel (cca 150 m) a ten se přivede do kobky č.8. Tato kobka je v současnosti používána jako vývod pro transformátor 22/3 kV; 6,3 MVA (studená záloha) a pro potřeby propojení rozvoden R22.1 a R22.4 se musí upravit. Kobka bude repasována. Stávající vypínač bude nahrazen novým vypínačem firmy ABB řady VD4. Odpínače zůstanou ponechány stávající. Dojde také k výměně proudových měničů a k výměně ochrany.

Po realizaci této akce se musí nově nastavit ochrany, jak na stávajícím kabelu A22009 mezi R22.1 a R22.3, tak na „novém“ kabelu mezi R22.1 a R22.4.

Dále navrhuji instalovat dálkové ovládání vypínače v rozvodně ACTHERM (R22.1), na který bude připojen kabel 22 kV z rozvodny ASSEL. Ovládací napětí 220 VDC bude přivedeno ze zálohovaného bateriového zdroje rozvodny R22.1. V rozvodně ASSEL (R22.4) bude instalováno fakturační měření spotřeby.

### 3.4 Návrh optimalizace instalovaného výkonu

Optimalizace instalovaného výkonu vycházela z těchto níže vypsanych zjednodušených základních předpokladů.

Součinitel zatížení transformátorů:

$$\beta = \frac{S}{S_N} \quad (-)$$

S je předpokládaný výkon transformátoru

$S_N$  štítkový výkon transformátoru.

Ztrátový činný výkon:

$$P_Z = P_O + P_K \quad (W)$$

$P_O$  jsou ztráty na prázdko

$P_K$  jsou ztráty na krátko

Celkové činné ztráty:

$$W_Z = P_O \cdot \tau_P + P_K \cdot \tau_Z \cdot \left( \frac{S_{MAX}}{S_N} \right)^2 \quad (Wh)$$

Ztráty naprázdno se liší dle typu transformátorů, leží mezi 1 % – 3 % jmenovitého výkonu. Kde nižších hodnot dosahují nové moderní transformátory. Pro naše účely uvažují se ztrátami na prázdko 2 %. Tyto celkové ztráty lze odstranit snížením instalovaného výkonu.

Areál společnosti je napájen elektrinou z několika rozveden a instalovaný výkon je poplatný výkonům a stavu, kdy výroba byla několikrát vyšší, a i obslužné provozy měly mnohem větší požadavky na dodávaný výkon. Při posouzení přepojitelnosti stávajících odběrných míst v rámci stávajících kabelových tras jsem stanovil možnost na snížení počtu napájecích transformátorů a tím pádem snížil celkový instalovaný výkon. Současný instalovaný výkon napájecích rozveden ve vlastnictví provozovatele je 55,75 MVA. Provedl jsme odečty a měření na jednotlivých odběrných místech, které nám ukázaly, jaké je stávající využití jednotlivých rozveden a transformátorů. Z uvedených dat navrhuji snížení instalovaného výkonu o 20 MVA.

Pro následný výpočet peněžní úspory je uvažováno s těmito předpoklady:

- Míra ztrát na prázdno 2 % z celkového instalovaného výkonu. Celkové ztráty na prázdno jsou 400 kVA.
- Míra ztrát na krátko je stejná, jak pro variantu před optimalizací, tak i pro variantu po optimalizaci.
- Provoz transformátorů 300 dní v roce, což je 7200 hodin.

Celkový ztrátový činný výkon na prázdno:

$$P_O = S_O \cdot \cos \varphi = 0,4 \cdot 0,86 = 0,344 \text{ MW}$$

Celková roční úspora energie:

$$W_{USPOŘ} = P_O \cdot \tau_P = 0,344 \cdot 7200 = 2476,8 \text{ MWh}$$

Při sazbě 2 200,- Kč / MWh je roční úspora **5 448 960,- Kč**.

Při navrhované optimalizaci bude možné zrušit pronájem rozvodny, kde je provozováno dalších instalovaných 35 MVA s dalšími ztrátami naprázdno.

Při obdobné kalkulaci a při započtení úspory za pronájem rozvodny lze očekávat další úspory.

## 4 Návrh centrální kompenzace

V této kapitole diplomové práce je proveden teoretický návrh centrální kompenzace výrobního závodu VT Chomutov.

Průmyslový objekt je napájen z napěťové hladiny 22 kV. Na této napěťové hladině je vybudována vnitřní kobková rozvodna, ze které jsou napájeny jednotlivé provozní celky závodu. Pro pokrytí výkonové potřeby jsou v místě instalace instalovány tři kusy transformátorů 22/6 kV o výkonu 6,3 MVA. V provozu jsou vždy pouze dva z těchto transformátorů a poslední zůstává jako rezervní (záložní) pro případ poruchy na používaných transformátorech. Provozovatel objektu nebyl ochoten poskytnout přesná data o skutečné spotřebě. Návrh centrální kompenzace proto vychází z podkladů hlavního energetika závodu, se kterým byla konzultována a stanovena tato zadávací vstupní data:

- 2x transformátor 22/6 kV – 6,3MVA
- Koeficient soudobosti zátěže  $\beta = 0,6$
- Účinník nekompensované soustavy  $\cos \varphi = 0,68$
- Požadovaný účinník po kompenzaci  $\cos \varphi = 0,98$  (induktivní charakter)

### Celkové výpočtové zatížení:

Celkový instalovaný zdánlivý příkon závodu:

$$S_N = S_{T1} + S_{T2} = 6,3 + 6,3 = 12,6 \text{ MVA}$$

Přepočtený celkový instalovaný zdánlivý příkon závodu:

$$S_P = S_N \cdot \beta = 12,6 \cdot 0,6 = 3,78 \text{ MVA}$$

Vypočtený činný příkon závodu:

$$P_P = S_N \cdot \cos \varphi = 3,78 \cdot 0,68 = 2,457 \text{ MW}$$

Vypočtený jalový příkon závodu:

$$Q_P = \sqrt{S_P^2 - P_P^2} = \sqrt{3,78^2 - 2,457^2} = 2,87 \text{ MVar}$$

### Určení kompenzačního výkonu:

Požadovaný účinník po kompenzaci  $\cos \varphi = 0,98$

Zdánlivý výkon po kompenzaci:

$$S_{PK} = \frac{P_P}{\cos \varphi} = \frac{2,457}{0,98} = 2,507 \text{ MVA}$$

Vypočtený jalový výkon po kompenzaci:

$$Q_{PK} = \sqrt{S_{PK}^2 - P_P^2} = \sqrt{2,507^2 - 2,457^2} = 0,498 \text{ MVAR}$$

Vypočtený kompenzační výkon:

$$Q_{KOMP} = Q_P - Q_{PK} = 2,87 - 0,498 = 2,372 \text{ MVAR}$$

Požadovaný kompenzační výkon závodu navýšíme o rezervu 15 %

$$Q_{K+15\%} = Q_{KOMP} \cdot 1,15 = 2,372 \cdot 1,15 = 2,73 \text{ MVAR}$$

Požadovaný kompenzační výkon závodu včetně 15% rezervy činí 2,73 MVAR a rozdělíme jej do čtyř spínaných stupňů s vahou spínání 1:2:2:2 o velikosti základního stupně 400 kVAR.

Tabulka 4.1 – Kompenzační stupně

Kompenzační stupeň	Q <sub>n</sub> (kVAR)	Q <sub>7%</sub> (kVAR)
1	400	370,6
2	800	741,2
3	800	741,2
4	800	741,2

#### 4.1 Návrh činitele zatlumení a typu kondenzátorů

Navrhovaná kompenzace je uvažována jako hrazená. Z tohoto důsledku vlivem zařazené tlumivky před samotný kondenzátor vzroste hodnota skutečného napětí na kondenzátoru. Konkrétní hodnotu napětí kondenzátoru je tedy závislá na činiteli zatlumení „p“ (kdy činitel zatlumení volíme 7 %) a určíme jej ze vztahu:

$$U_{C7\%} = \frac{U_N}{1-p} = \frac{22}{1-0,07} = 23,7 \text{ kV}$$

Pro námi navrhovanou kompenzací uvažujeme s použitím jednofázových kompenzačních kondenzátorů firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23 – C4 (maximální provozní napětí 24 kV). Pro první stupeň je tedy navrhován jeden kondenzátor o výkonu 400 kVAR. Ostatní stupně budou realizovány vždy samostatným kondenzátorem o výkonu 800 kVAR. Celkový instalovaný kompenzační výkon je tedy stanoven na 2,8 MVAR.



## 4.2 Výpočet impedance hradící tlumivky

Pro návrh impedance tlumivky stanovíme reaktanci kondenzátoru pomocí činitele zatlumení reaktanci tlumivky a následně její indukčnost. Níže uvedený výpočet je stanoven pouze pro první stupeň s výkonem 400 kVAr, pro ostatní stupně je výpočet naprosto stejný a výsledné hodnoty jsou uvedeny níže v tabulce 4.2.

$$X_{C400} = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} = \frac{23700^2}{400000} = 1404,2 \Omega$$

$$X_{L400} = p \cdot X_C = 0,07 \cdot 1404,2 = 98,3 \Omega$$

Indukčnost tlumivky:

$$L_{L400} = \frac{X_L^2}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{98,3^2}{2 \cdot \pi \cdot f} = 312,9 \text{ mH}$$

Tabulka 4.2 – Volba hradících tlumivek

Stupeň (kVAr)	$X_C$ ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )	L (mH)
400	1404,2	98,3	312,9
800	702,1	49,14	156,4
800	702,1	49,14	156,4
800	702,1	49,14	156,4

Nyní ještě výpočtem ověříme skutečnou hodnotu kompenzačního výkonu pro spojení dané tlumivky a kondenzátoru. Výpočet je proveden opět pro první stupeň.

Výsledná reaktance LC článku:

$$X_{LC1} = (1 - p) \cdot X_{C400} = (1 - 0,07) \cdot 1404,2 = 1305,9 \Omega$$

Skutečný kompenzační výkon:

$$Q_{LC1} = \frac{U_N^2}{X_{LC1}} = \frac{22000^2}{1305,9} = 370,6 \text{ kVAr}$$

Pro další kompenzační stupně je postup výpočtu stejný a výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Z výpočtů je patrné, že skutečný kompenzační výkon je cca o 7 % menší.

## 5 Návrh filtračně kompenzačního zařízení

Provedení způsobu kompenzace průmyslového objektu VT Chomutov je před provedením samotné rekonstrukce stávající a technologie je ještě z dob výstavby tohoto objektu (šedesátá léta 20 století). Jednotlivé skupinové kompenzace na napěťové hladině nn (400 V a 500 V) jsou nefunkční. Centrální kompenzace na napěťové hladině 22 kV s filtrací páté, sedmé a jedenácté harmonické je také již vyřazena z provozu. V současném systému provozu, kde jsou instalovány pohony řízené frekvenčními měniči a z důvodu proměnlivé zátěže hlavního pohonu děrováku ( $U_n = 6 \text{ kV}$ ,  $P_n = 6,2 \text{ MW}$ ) vyvstal požadavek na provedení nové dynamické kompenzace, který by eliminoval vliv těchto zařízení na síť a zároveň z ekonomických důvodů udržoval požadovaný účinník  $\cos \varphi$  na úrovni 0,98. Při nedodržení těchto parametrů platí společnost nemalé finanční částky jako penalizaci za nevykompenzování.

Výchozími podklady pro návrh filtračně kompenzačního zařízení jsou technická data stávajících kondenzátorových baterií a výkonové požadavky, tak jak jsou popsány v kapitole 4 (2x trafo 22/6 kV o výkonu  $P_n = 6,3 \text{ MVA}$  a požadovaný kompenzovaný účinník  $\cos \varphi = 0,98$ ).

Pro tyto účely navrhuji realizovat kompenzaci pomocí filtračně kompenzačního zařízení (filtrace páté, sedmé a jedenácté harmonické) s umístěním na napěťové hladině 22 kV s dekompenzačními tlumivkami umístěnými na napěťové hladině 6 kV. Zdrojem konstantního kompenzovaného výkonu budou kondenzátorová baterie. Řídící prvky válcovacích pohonů v závodě jsou zdrojem rušivých harmonických. Z těchto zřejmých důvodů budou před jednotlivé kondenzátorové baterie instalovány tlumivky a tato kompenzace je tedy navržena jako hrazená kompenzace. Regulačním prvkem kompenzačního zařízení bude dekompenzační tlumivka, jejíž svorkové napětí, a tudíž i induktivní jalový výkon je regulován tyristorovým fázově řízeným střídavým měničem typu COMPACT. Úhel řízení měniče je řízen na základě požadavku na velikost jalového výkonu kompenzačního zařízení tak, aby v každém okamžiku byl rozdíl výkonu kondenzátorových baterií a tlumivek roven požadovanému kompenzačnímu výkonu.

V rozvodně R22.4 (22 kV) bude využita stávající kobka č.8 pro napájení kompenzačních členů s využitím stávající kabelového vedení (22-AKTOPV 3x240 mm<sup>2</sup>).

**Sestava filtrace páté harmonické** – zde navrhuji využít stávající hradící tlumivku výrobní řady DDR 20/50/38.1 (výrobní číslo 12038/1978) s parametry:  $L = 37,7 \text{ mH}$ ,  $I_n = 60 \text{ A}$  při kmitočtu základní harmonické 50 Hz, 45 A při kmitočtu páté harmonické 250 Hz, krátkodobý zatěžovací proud po dobu 1 s je 1,2 kA. Za touto tlumivkou bude zapojena sestava šesti kusů kondenzátorových baterií v paralelním zapojení. Kondenzátory jsou navrženy od firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23-15,6/420/WF s kapacitou kondenzátoru  $5,49 \mu\text{F}$ . Základní technické údaje jsou uvedeny v tabulce 5.1. Zapojení kondenzátorové baterie filtru páté harmonické je patrna z přílohy č.4.

*Tabulka 5.1 – kondenzátorová baterie pro filtr 5. harmonické*

Napěťová soustava	22k kV / IT
Jmenovité napětí kondenzátorů	27 kV
Instalovaný výkon	2,52 MVA <sub>r</sub>
Počet kondenzačních jednotek	6
Jmenovité napětí	23,1 kV
Kompenzační výkon při jmenovitém napětí	1,92 MVA <sub>r</sub>
Jmenovitý proud	60 A
Kmitočet ladění	247 Hz
Rozměry	1700 x 1200 x 1200 mm

**Sestava filtrace sedmé harmonické** – zde navrhuji využít stávající hradící tlumivku výrobní řady DDR 20/50/38.1 (výrobní číslo 12039/1978) s parametry:  $L = 38,1 \text{ mH}$ ,  $I_n = 30 \text{ A}$  při kmitočtu základní harmonické 50 Hz, 55 A při kmitočtu sedmé harmonické 350 Hz, krátkodobý zatěžovací proud po dobu 1 s je 1,2 kA. Za touto tlumivkou je zapojena sestava šesti kusů kondenzátorových baterií v paralelním zapojení. Kondenzátory jsou navrženy od firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23-15,6/420/WF  $5,49 \mu\text{F}$ . Základní technické údaje jsou uvedeny v tabulce 5.2. Zapojení kondenzátorové baterie filtru sedmé harmonické je patrné z přílohy č.5.

*Tabulka 5.2 – kondenzátorová baterie pro filtr 7. harmonické*

Napěťová soustava	22k kV / IT
Jmenovité napětí kondenzátorů	27 kV
Instalovaný výkon	1,25 MVar
Počet kondenzačních jednotek	6
Jmenovité napětí	23,1 kV
Kompenzační výkon při jmenovitém napětí	0,92 MVar
Jmenovitý proud	30 A
Kmitočet ladění	347 Hz
Rozměry	1700 x 1200 x 1200 mm

**Sestava filtrace jedenácté harmonické** – zde navrhuji využít stávající hradící tlumivku výrobní řady DDR 20/50/38.1 (výrobní číslo 12039/1978) s parametry:  $L = 15,4$  mH,  $I_n = 3$  A při kmitočtu základní harmonické 50 Hz, 15 A při kmitočtu jedenácté harmonické 550 Hz, krátkodobý zatěžovací proud po dobu 1 s je 1,2 kA. Za touto tlumivkou je zapojena sestava šesti kusů kondenzátorových baterií v paralelním zapojení. Kondenzátory jsou navrženy od firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23-15,6/420/WF 5,49  $\mu$ F. Základní technické údaje jsou uvedeny v tabulce 5.3. Zapojení kondenzátorové baterie filtru jedenácté harmonické je patrné z přílohy č.5.

*Tabulka 5.3 – kondenzátorová baterie pro filtr 11. harmonické*

Napěťová soustava	22k kV / IT
Jmenovité napětí kondenzátorů	27 kV
Instalovaný výkon	1,25 MVar
Počet kondenzačních jednotek	6
Jmenovité napětí	23,1 kV
Kompenzační výkon při jmenovitém napětí	0,92 MVar
Jmenovitý proud	30 A
Kmitočet ladění	547 Hz
Rozměry	1700 x 1200 x 1200 mm

Dekompenzační člen soustavy bude tvořen dekompenzačním rozváděčem RC6.9, který je složen ze třífázové měničové sestavy COMPACT CK 28 a tří dekompenzačních tlumivek firmy ČKD Elektrotechnika výrobní řady KTL 149/148. Základní technické údaje tlumivek jsou uvedeny v tabulce 5.4. Dekompenzační člen bude připojen na napěťovou hladinu 6 kV a bude napojen ze stávající rozvodny R6.9 kobky č.3 za pomoci kabelu typu 6-AYKCY 3x185 mm<sup>2</sup>. Propojení dekompenzačního rozváděče RC6.9 s jednotlivými tlumivkami bude za pomoci jednožilových měděných vodičů typu N2XSY 20 2x35/16 mm<sup>2</sup>. Kabely budou uloženy v drátěných žlabech nebo v kabelovém MARS žlabu. Schéma uspořádání dekompenzačního rozváděče s tlumivkami je patrné z přílohy č.6.

*Tabulka 5.4 – 3ks jednofázová dekompenzační tlumivka*

Provozní napětí	6k kV / IT
Inukčnost	90 mH
Jmenovité proud	215 A
Chlazení	AN
Stupeň krytí	IP00
Třída zatížení	100 % trvale
Rozměry	1490 x 1700 x 2100 mm
Hmotnost	740 kg

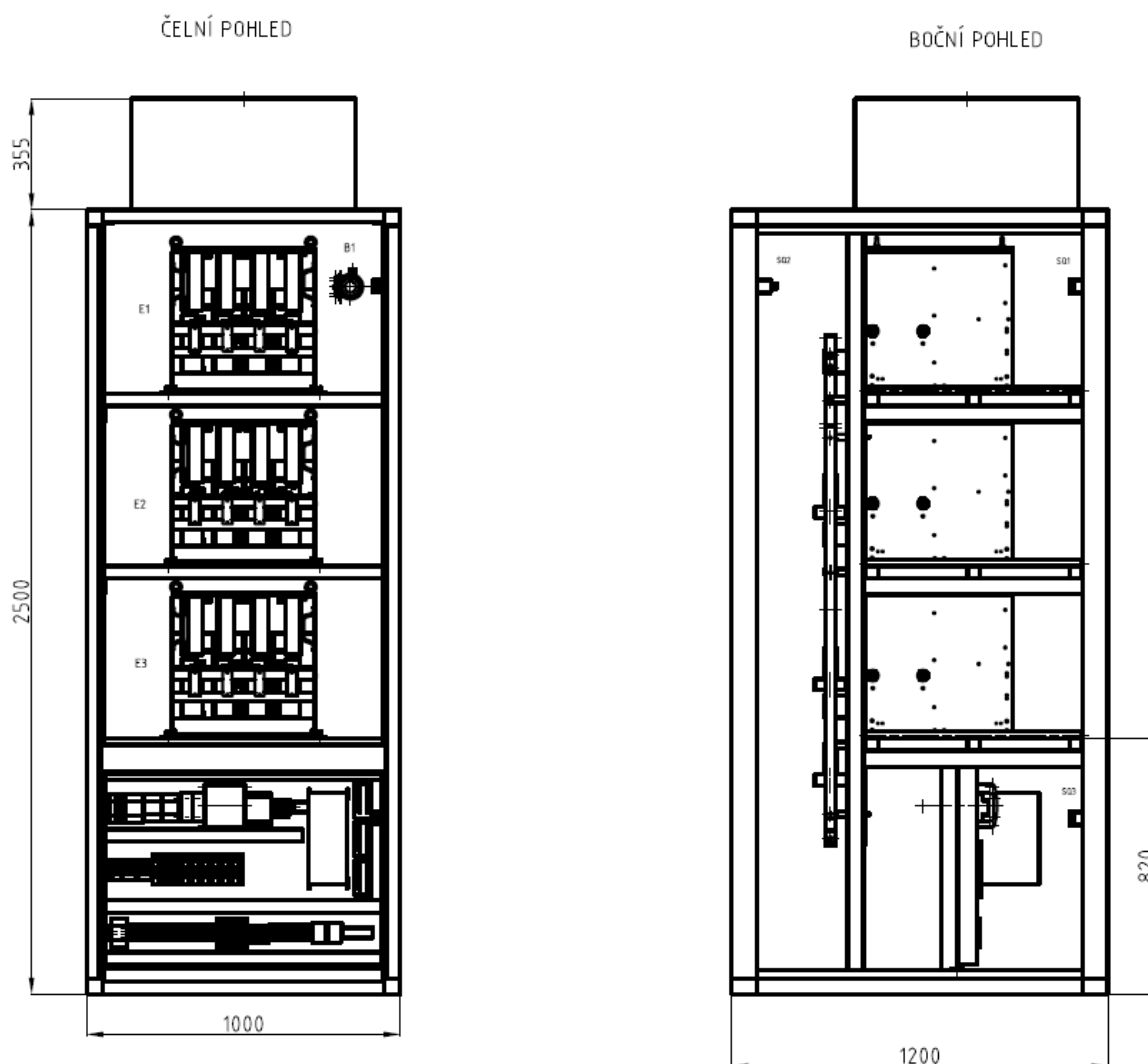
## 6 Řízení kompenzačního zařízení

Pro řízení dekompenzačních tlumivek je navržena měničová a regulační sestava COMPACT CK28, jejíž základní technické parametry jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1 – 1ks třífázová měničová sestava COMPACT CK28

Vstupní napětí	3x 6k kV / IT
Výstupní napětí	3x 6k kV / IT
Výstupní proud	3 x 215 A
Proudový vstup regulátoru	0 – 1 A
Napěťový vstup regulátoru	0 – 100 V
Chlazení	vzduchové
Zapojení	fázově řízený střídavý spínač
Rozměry	1000 x 1200 x 2500 mm
Hmotnost	800 kg

Měničové zařízení se skládá z jedné skříně rozdělené na vysokonapěťovou a nízkonapěťovou část. Vysokonapěťová část (horní dveře skříně) obsahuje tři součástkové bloky (každý blok pro jednu fázi) pro řízení napětí na dekompenzační tlumivce. Nízkonapěťová část (spodní dveře skříně) obsahuje pomocné obvody (svorkovnice, jističe, stykače, relé, zdroje), optoelektronický regulátor pro převod elektrických zapínacích impulsů úrovně 24 V DC na optický signál pro optické tyristory. Dále je v této části umístěn regulátor dekompenzace pro řízení třífázového antiparalelního měniče. Regulátor svými logickými výstupy ovládá vn vypínač pro připojení napětí 6 kV na měnič a dále pak může ovládat až tři vn vypínače filtrů vyšších harmonických. Měničová sestava neobsahuje žádné ochrany vn vypínačů. Zobrazovací a ovládací panel se standardně montuje do pultu zákazníka a propojuje se s regulátorem pomocí komunikační linky RS485.



Obrázek 6.1 Sestava COMPACT CK28 – čelní a boční pohled

## 6.1 Základní charakteristika regulátoru

Regulátor EMADYN-D-K může být ovládán (vypnutí / zapnutí kompenzace) těmito způsoby:

- Vývojové prostředí Místně, pomocí kontaktních ovladačů (tlačítek, přepínačů) a dále prostřednictvím dotykového displeje ovládacího panelu EasyView, vše umístěno na dveřích externí řídicí skříně.
- Dálkově, prostřednictvím externích kontaktních logických vstupů regulátoru.
- Dálkově po sériové lince, prostřednictvím příkazů z nadřazeného řídicího systému (protokol Modbus).

Nadřazený řídicí systém může po sériové lince zadávat regulátoru EMADYN-D-K zejména

žádanou hodnotu  $\cos \varphi$  nebo žádaný jalový výkon kompenzované sítě. Regulátor EMADYN-D-K umožňuje (v rámci možností daných dimenzováním kondenzátorových filtrů a dekompenzačních tlumivek) realizovat:

- Regulaci  $\cos \varphi$ .
- Regulaci jalového výkonu napájecí (kompenzované) sítě.

Při regulaci  $\cos \varphi$  resp. jalového výkonu může regulátor EMADYN-D-K realizovat:

- Symetrizaci napájecí (kompenzované) sítě, tj. regulátor řídí obecně různé proudy třemi dekompenzačními tlumivkami (zapojenými do trojúhelníku) tak, aby v kompenzované síti byla potlačena zpětná složka proudů.
- Symetrické řízení dekompenzačního členu, tj. regulátor řídí stejné proudy dekompenzačními tlumivkami ve všech třech fázích.

## **6.2 Přínosy navrhovaného řešení**

Přes vyšší vstupní náklady na vybudování filtračně kompenzačního zařízení jsou jejím hlavním přínosem dynamická regulace kompenzačního výkonu s přizpůsobením momentálnímu charakteru zátěže a zároveň možnost rozvoje závodu do budoucna. Vzhledem k absenci kompenzačního prvku v závodě, byl provozovatel průmyslového objektu neustále penalizován za překročení neutrálního pásma účinníku  $\cos \varphi$ , a tím pádem investované náklady se investorovi vrátili do šesti měsíců od zprovoznění filtračně kompenzačního zařízení.



## Závěr

V první kapitole jsem obecně popsal základní teorii kompenzaci účinníku s vysvětlením základních výkonových vztahů. Poté jsem provedl výčet možností provedení kompenzace jako je individuální, skupinová a centrální. V další části této kapitoly jsou uvedeny technické možnosti provedení kompenzace za použití statických kondenzátorů nechráněných a chráněných (takzvaná hrazená kompenzace), rotačních kompenzačních zařízení s využitím synchronního stroje jako zdroje indukční jalové energie. Je zde také popsáno filtračně kompenzačního zařízení s možností eliminace vyšších harmonických zejména třetí, páté, sedmé a jedenácté harmonické.

Ve druhé kapitole jsou popsány produkty dvou předních výrobců působících na našem trhu, mezi které patří firmy Emcos Teplice a ZES Silko. Jednotlivé informace k daným produktovým řadám, jsem čerpal z dostupných firemních dokumentů daných společností, jako jsou katalogy, manuály a ostatní propagační materiály.

Ve třetí kapitole jsem popsal návrh na provedení revitalizace napájecí soustavy průmyslového objektu VT Chomutov. Tato revitalizace byla rozdělena do dvou částí. V první etapě je řešena rekonstrukce kompenzace a připojení velkých spotřebičů, včetně kritického motoru děrováku na nový, kompenzovaný rozvod energie a druhá etapa je navrhována pro optimalizaci celkového instalovaného výkonu, která sebou ovšem přináší vybudování nové 6 kV rozvodny a přepojení rozvodů nn a vn částí dle navrhovaného řešení (viz přílohy).

Ve čtvrté kapitole je proveden návrh centrální chráněné kompenzace na straně napětí 22 kV. Pro výpočet jsem vycházel ze zadávacích podmínek provozovatele závodu a celkový kompenzační výkon byl stanoven na 2,80 MVar s rozdělením do čtyř spínaných stupňů s vahou spínání 1:2:2:2 (400:800:800:800). Jednotlivé kondenzátory jsou zvoleny od firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23. Před kondenzátory jsem navrhl instalovat hradící tlumivky. Kde hodnota tlumivky pro kompenzační výkon prvního stupně 400 kVAr je 312,9 mH a pro ostatní stupně kompenzačního výkonu 800 kVAr jsou 156,4 mH.

V páté kapitole jsem popsal realizaci filtračně kompenzačního zařízení s kompenzací na straně napětí 22 kV a dekompenzací na napěťové hladině 6 kV. Filtračně kompenzační zařízení je navrženo na filtraci páté, sedmé a jedenácté harmonické. Pro filtraci páté harmonické je navržena kondenzátorová baterie tvořená šesti kusy kondenzátorů firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23-15,6/420/WF s kapacitou kondenzátoru 5,49  $\mu\text{F}$  s celkovým kompenzačním výkonem 2,52 MVar. V obvodu připojení kondenzátorové baterie je předřazena hradící tlumivka výrobní řady DDR 20/50/38.1 s parametry:  $L = 37,7 \text{ mH}$ ,

$I_n = 60$  A při kmitočtu základní harmonické 50 Hz, 45 A při kmitočtu páté harmonické 250 Hz, krátkodobý zatěžovací proud po dobu 1 s je 1,2 kA. Pro filtraci sedmé harmonické je navržena kondenzátorová baterie tvořená šesti kusy kondenzátorů firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23-15,6/420/WF s kapacitou kondenzátoru 5,49  $\mu$ F s celkovým kompenzačním výkonem 1,25 MVar. V obvodu připojení kondenzátorové baterie je předřazena hradící tlumivka výrobní řady DDR 20/50/38.1 s parametry:  $L = 38,1$  mH,  $I_n = 30$  A při kmitočtu základní harmonické 50 Hz, 55 A při kmitočtu sedmé harmonické 350 Hz, krátkodobý zatěžovací proud po dobu 1 s je 1,2 kA. Pro filtraci jedenácté harmonické je navržena kondenzátorová baterie tvořená šesti kusy kondenzátorů firmy ZES Silko výrobní řady CUEFS 23-15,6/420/WF s kapacitou kondenzátoru 5,49  $\mu$ F s celkovým kompenzačním výkonem 1,25 MVar. V obvodu připojení kondenzátorové baterie je předřazena hradící tlumivka výrobní řady DDR 20/50/38 s parametry:  $L = 15,4$  mH,  $I_n = 30$  A při kmitočtu základní harmonické 50 Hz, 15 A při kmitočtu jedenácté harmonické 550 Hz, krátkodobý zatěžovací proud po dobu 1 s je 1,2 kA.

V šesté kapitole jsem popsal řízení kompenzačního zařízení pomocí třífázové měničové sestavy COMPACT CK28 od výrobce ČKD Elektrotechnika s řídicím regulátorem EMADYN-D-K. Tato sestava řídí spínání jednotlivých dekompenzačních tlumivek, a tím dynamicky reaguje na potřeby dekompenzace celé rozvodné soustavy a plynulé udržování stabilního účinníku na hodnotě 0,98.

Mezi hlavní přínos provedení filtračně kompenzačního zařízení je dynamická regulace kompenzačního výkonu s přizpůsobením momentálnímu charakteru zátěže a zároveň možnost rozvoje závodu do budoucna. Tyto výhody nesporně kompenzují počáteční vyšší vstupní náklady, které se vzhledem k předchozím penalizacím za překročení neutrálního pásma účinníku  $\cos \varphi$  vrátili do šesti měsíců od zprovoznění filtračně kompenzačního zařízení.

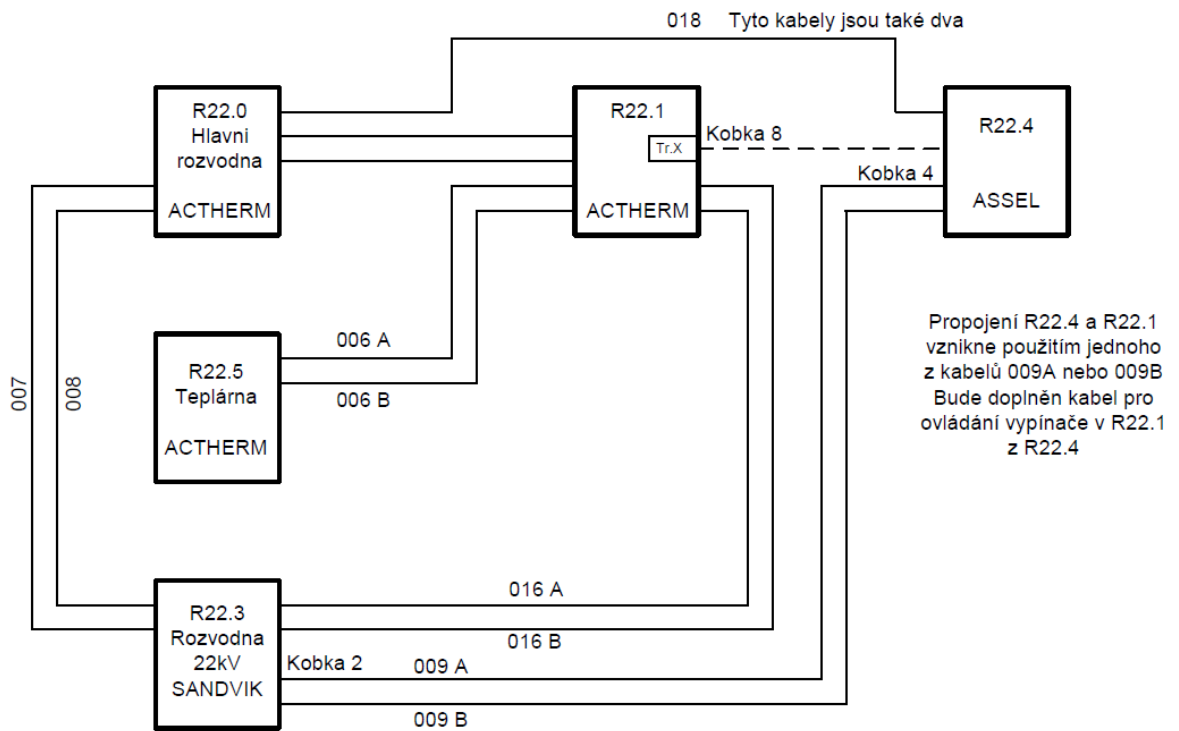
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 195 s. ISBN 80-708-2976-1.
- [2] KORENC, Vladimír. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1999, 127 s. ISBN 80-862-3007-4.
- [3] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [4] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-730-0164-0.
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. Ostrava: Vydala VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008, 364 s. ISBN 978-807-2252-916.
- [6] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008, 168 s. ISBN 978-807-0437-247.
- [7] Firemní dokumenty kompenzace společnosti Emcos s.r.o.
- [8] Firemní dokumenty kompenzace společnosti ZES Silko s.r.o.

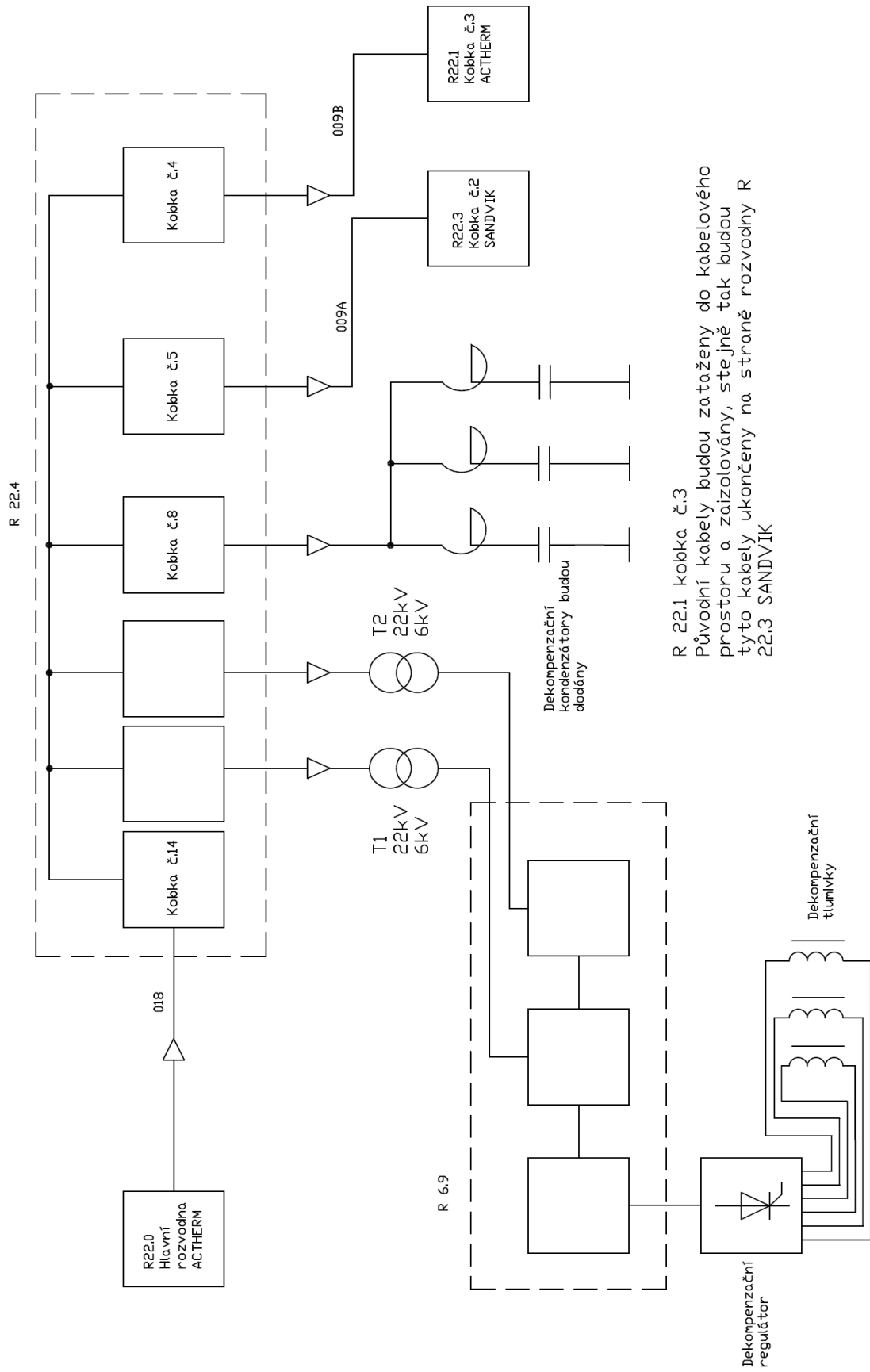
## **Přílohy**

1. Návrh revitalizace kabelového propojení
2. Přehledové schéma napájení
3. Přehledové schéma rozvodu kompenzace FKZ
4. Zapojení kondenzátorových baterií páté harmonické.
5. Zapojení kondenzátorových baterií sedmé a jedenácté harmonické.
6. Dekompenzační tlumivky
7. Navrhovaná druhá etapa revitalizace napájení VT Chomutov
8. Návrh nové rozvodny 6 kV

## Příloha č.1 - Návrh revitalizace kabelového propojení

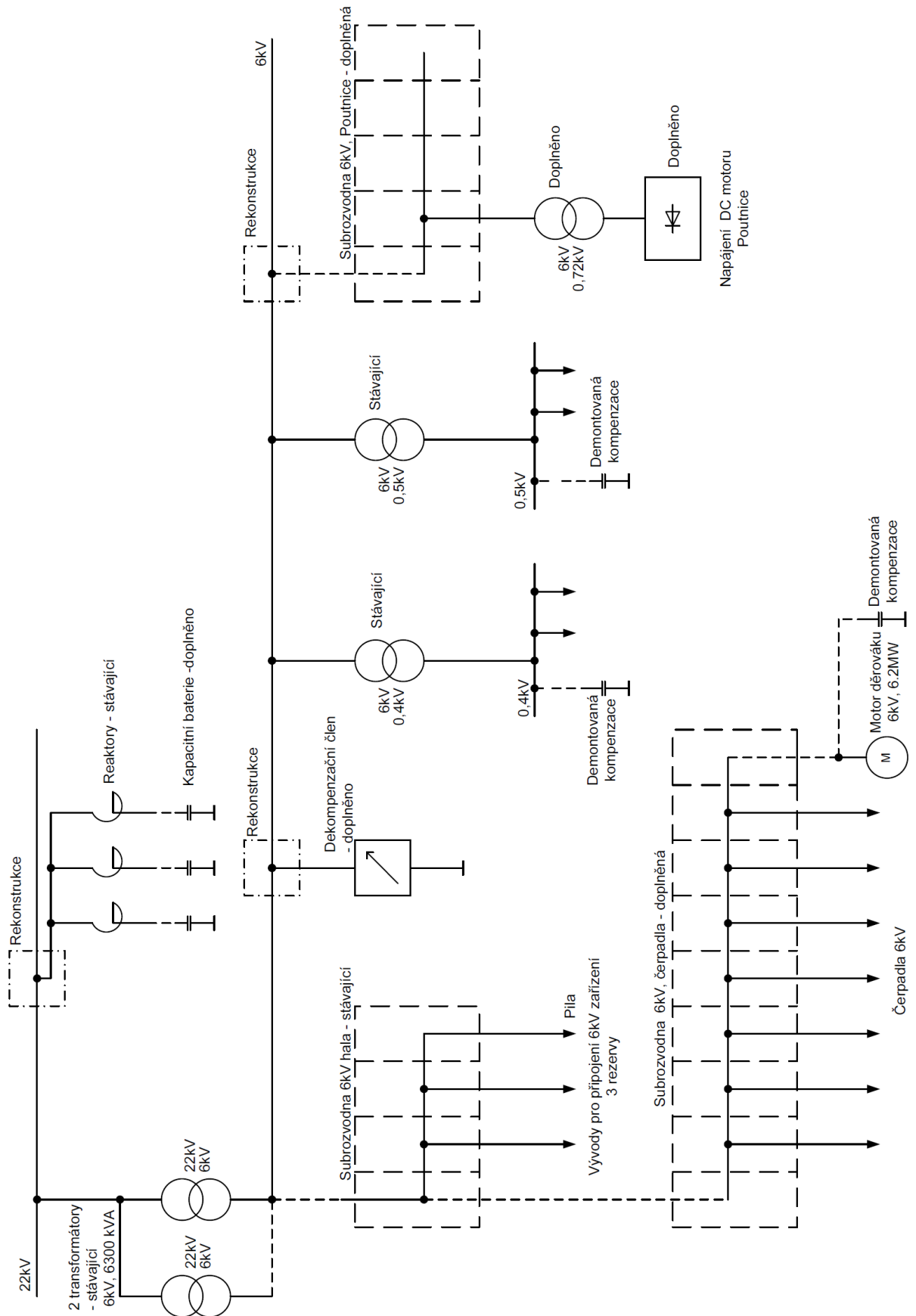


## Příloha č.2 - Přehledové schéma napájení

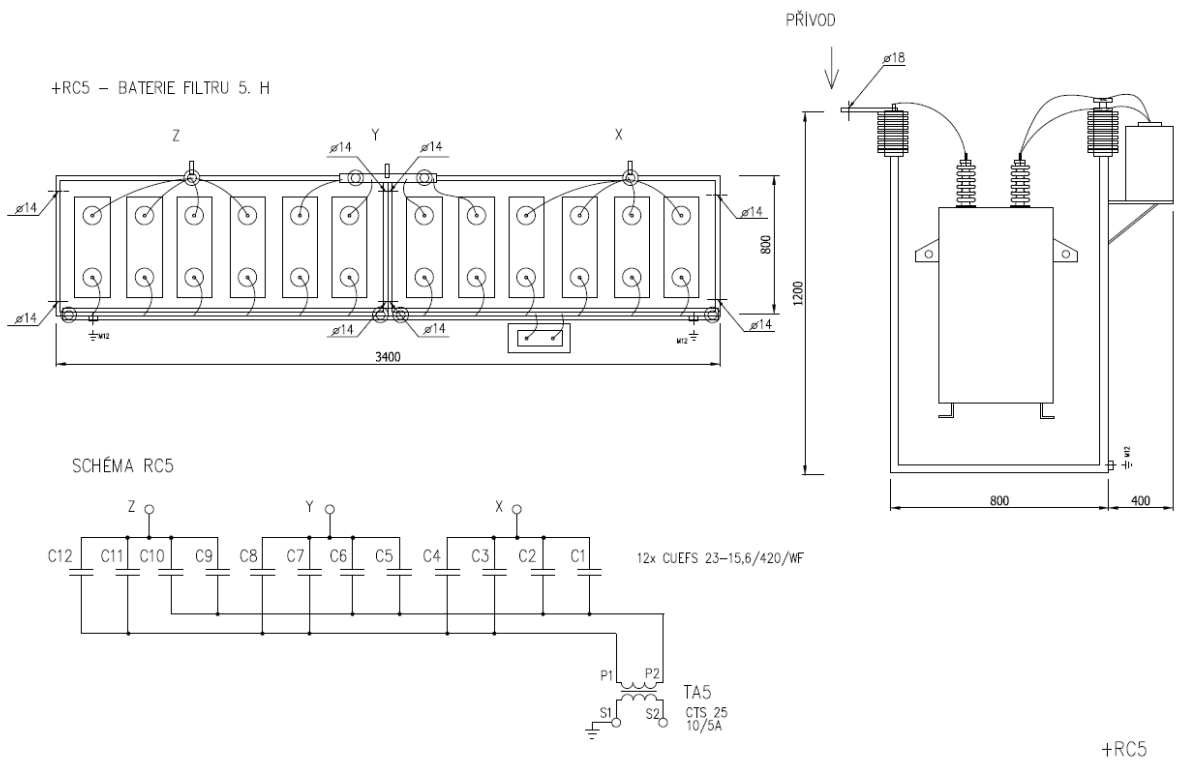


R 22.1 kabka č.3  
 Původní kabely budou zatáženy do kabelového prostoru a zaizolovány, stejně tak budou tyto kabely ukončeny na straně rozvodny R 22.3 SANDVIK

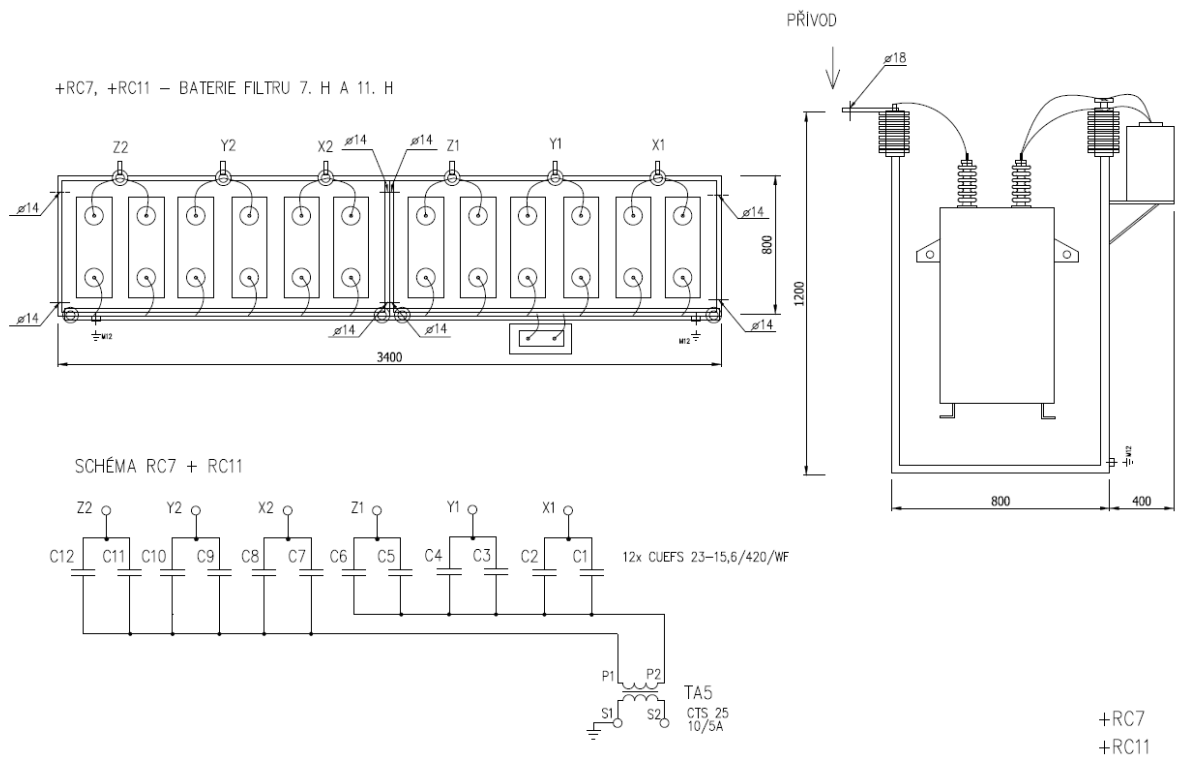
### Příloha č.3 - Přehledové schéma rozvodu kompenzace FKZ



## Příloha č.4 - Zapojení kondenzátorových baterií páté harmonické

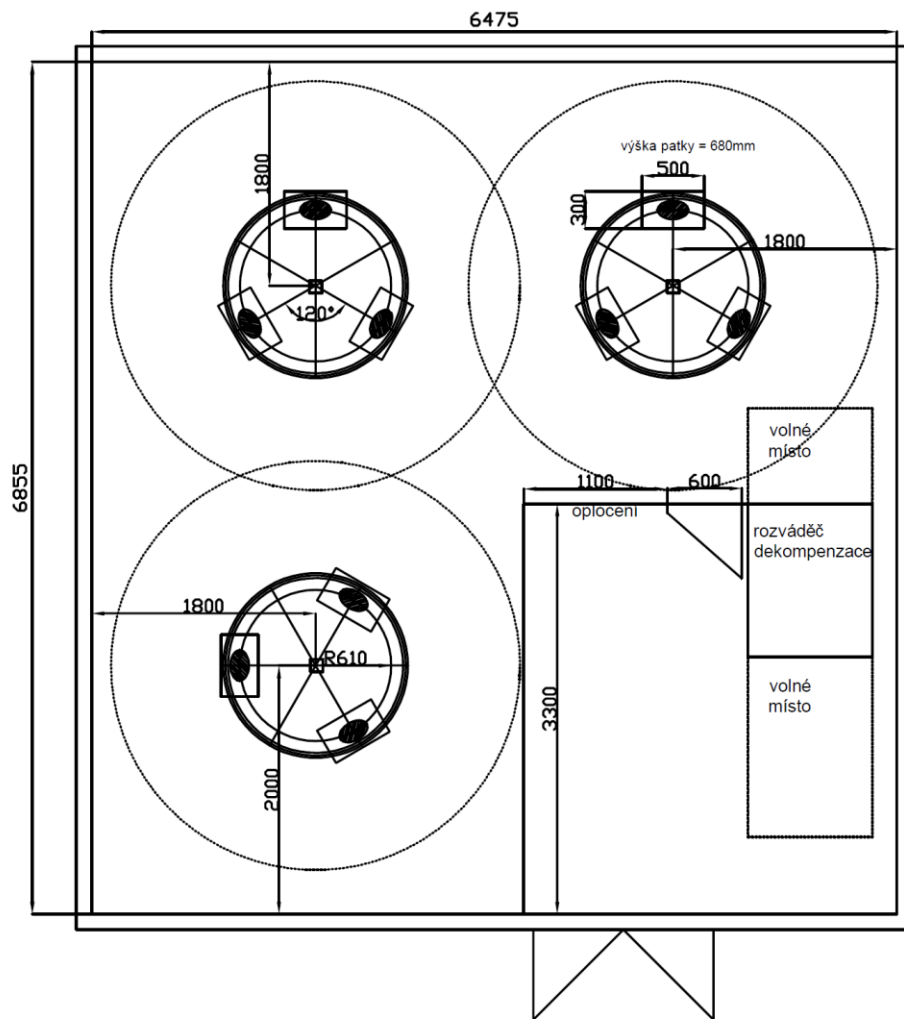


## Příloha č.5 - Zapojení kondenzátorových baterií sedmé a jedenácté harmonické





## Příloha č.6 - Dekompenzační tlumivky



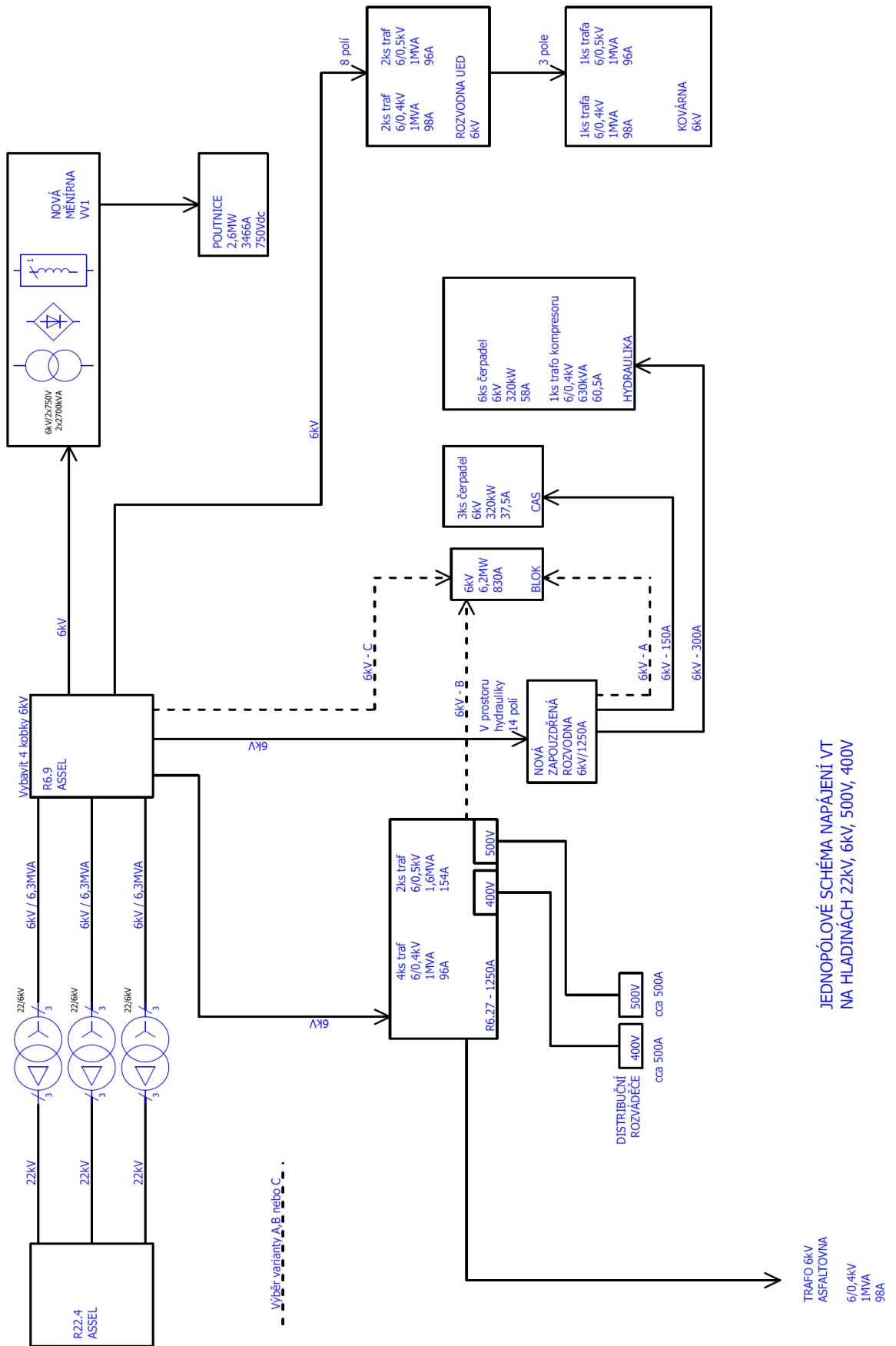
Místnost  
č. 204

### Rozváděč Dekompence:

Přívod 6kV - r6.9 kobka  
kabel 6-AYKCY 3x185/25

Přívod a vývody spodem

# Příloha č.7 - Navrhovaná druhá etapa revitalizace napájení VT Chomutov



## Příloha č.8 - Návrh nové rozvodny 6 kV

### ZÁKLADNÍ ÚDAJE:

Provedení: skříňový, vzduchem izolovaný  
 Jmenovité napětí: min. 7,2kV  
 Jmenovitý proud:  $I_n = 1250A$   
 Jmenovitý krátkodobý výdržný proud:  $I_{th} = 20kA / 3s$   
 Jmenovitý dynamický proud:  $I_{dyn} = 50kA$   
 Vypínače: vakuové  
 Krytí: IP 53/20  
 Obě krajní pole s možností rozšíření

### MINIMÁLNÍ PŘÍSLUŠENSTVÍ:

2ks vozík pro výměnu vypínačů  
 1ks zkratovací souprava přípojnic

