

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh řešení kompenzace účinníku v průmyslovém  
podniku**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Bc. Martin RENNER**  
Osobní číslo: **E16N0024K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh řešení kompenzace účinníku v průmyslovém podniku**  
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 :

1. Popište problematiku kompenzace účinníku obecně. Pravidla, technické předpoklady, normy ČSN IEC.
2. Uveďte možnosti jednotlivých způsobů kompenzace. Porovnejte a diskutujte.
3. Navrhněte postup řešení kompenzace účinníku v zadané oblasti průmyslového podniku a respektujte ČSN IEC.
4. Vypracujte základní ekonomickou rozvahu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

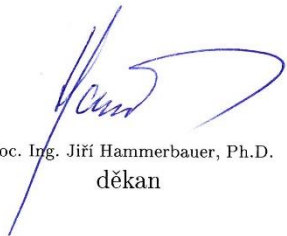
Seznam odborné literatury:

1. Přednášky z doporučených předmětů.
2. Elektronické informační zdroje, katalogy, ČSN IEC.
3. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce po první konzultaci DP.


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Zbyněk Martínek, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



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

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem řešení kompenzace účinníku v zadané oblasti závodu Mondi Štětí a.s. V úvodu této práce je popsána teorie problematiky kompenzace účinníku a možnosti jednotlivých způsobů kompenzace. Praktická část řeší kompenzaci účinníku rozvodné sítě vodního hospodářství. Závěrečná část je zaměřena na ekonomickou rozvahu kompenzace účinníku v řešené části podniku.

## **Klíčová slova**

Účinník, kompenzace účinníku, chráněná kompenzace, činný výkon, jalový výkon, kondenzátor, tlumivka.

**Abstract**

This diploma thesis deals with the proposal of solution of performance compensation in specified area of Mondi Štětí a.s. The introduction to this thesis describes the theory of power factor compensation and the possibilities of individual ways of compensation. The practical part solves the power factor compensation of strong water distribution network. The final part focuses on the economic balance of the power factor compensation in the part of the company.

**Key words**

Power factor, power factor correction, protected power factor correction, active power, reactive power, capacitor, inductor.

## 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 20.5.2018

Martin Renner

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Zbyňku Martínkovi, CSc. za profesionální rady, cenné připomínky a vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Radku Ferzikovi za cenné konzultace a poskytnutí odborných informací. Zároveň touto cestou děkuji i mé rodině a přátelům za všestrannou podporu při studiu.

# Obsah

ÚVOD.....	10
<b>1 TEORIE KOMPENZACE ÚČINNÍKU.....</b>	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY.....	13
1.1.1 Činný výkon.....	14
1.1.2 Jalový výkon.....	14
1.1.3 Zdánlivý výkon.....	14
1.1.4 Účinník.....	15
1.1.5 Deformační výkon.....	15
1.1.6 Opravdový účinník.....	16
1.2 VÝZNAM KOMPENZACE ÚČINNÍKU.....	16
1.2.1 Důsledky špatného účinníku.....	18
1.2.2 Výhody kompenzace účinníku.....	19
1.3 SPOTŘEBIČE JALOVÉHO VÝKONU.....	19
1.3.1 Asynchronní motory.....	19
1.3.2 Asynchronní generátory.....	20
1.3.3 Transformátory.....	21
1.3.4 Střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece.....	21
1.3.5 Výkonové polovodičové měniče.....	22
1.3.6 Venkovní a kabelová vedení.....	22
1.3.7 Osvětlovací soustavy.....	22
1.3.8 Ostatní spotřebiče jalového výkonu.....	23
1.4 POŽADAVKY NA KOMPENZACI JALOVÉHO VÝKONU U ODBĚRATELŮ.....	23
<b>2 ZPŮSOBY KOMPENZACE ÚČINNÍKU.....</b>	<b>25</b>
2.1 DĚLENÍ KOMPENZACE DLE UMÍSTĚNÍ.....	25
2.1.1 Individuální kompenzace.....	25
2.1.1.1 Individuální kompenzace asynchronního motoru.....	26
2.1.1.2 Kompenzace proudu transformátoru naprázdno.....	26
2.1.2 Skupinová kompenzace.....	27
2.1.3 Centrální kompenzace.....	28
2.1.4 Kombinovaná kompenzace.....	28
2.2 DĚLENÍ KOMPENZACE DLE TECHNICKÝCH PROSTŘEDKŮ.....	28
2.2.1 Rotační kompenzační zařízení.....	28
2.2.2 Statické kompenzátory.....	30
2.2.2.1 Prostá kompenzace.....	30
2.2.2.2 Chráněná kompenzace.....	32
2.2.2.3 Kompenzační filtry.....	33
2.2.2.4 Aktivní filtry.....	35
2.3 KOMPONENTY KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	35
2.3.1 Regulátory jalového výkonu.....	35
2.3.1.1 Eletromechanické regulátory.....	35
2.3.1.2 Analogové regulátory.....	36
2.3.1.3 Číslicové regulátory.....	36
2.3.2 Kondenzátory.....	36
2.3.2.1 Samohojitelnost.....	37
2.3.2.2 Přetlaková pojistka.....	37
2.3.3 Spínací prvky.....	38
2.3.3.1 Kontaktní spínací prvky.....	38
2.3.3.2 Bezkontaktní spínací prvky.....	40
2.3.4 Tlumivky.....	40
2.3.4.1 Ochranné tlumivky.....	40
2.3.4.2 Filtrační tlumivky.....	41
2.3.4.3 Dekompenzační tlumivky.....	41



<b>3</b>	<b>NÁVRH ŘEŠENÍ KOMPENZACE ÚČINNÍKU .....</b>	<b>42</b>
3.1	TECHNOLOGIE VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ .....	42
3.1.1	<i>Zásobování vodou.....</i>	42
3.1.2	<i>Biologická čistírna odpadních vod.....</i>	43
3.2	LOKÁLNÍ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA.....	44
3.2.1	<i>Rozvodny V118 a R214.....</i>	44
3.2.2	<i>Rozvodny U210.....</i>	46
3.3	VÝPOČET A DIMENZOVÁNÍ KOMPENZAČNÍCH PRVKŮ .....	47
3.3.1	<i>Měřené hodnoty.....</i>	48
3.3.2	<i>Návrh kompenzace rozvodny V118.....</i>	51
3.3.3	<i>Návrh kompenzace rozvodny U210 .....</i>	56
3.3.3.1	<i>Návrh vn kompenzace účinníku celé spotřeby rozvoden U210.....</i>	57
3.3.3.2	<i>Návrh vn kompenzace účinníku motorů dmychadel.....</i>	59
3.3.3.3	<i>Návrh nn kompenzace účinníku rozvaděčů U210/RM1 a U210/RM2.....</i>	61
<b>4</b>	<b>EKONOMICKÁ ROZVAHA REALIZACE KOMPENZACE ÚČINNÍKU.....</b>	<b>65</b>
4.1	INVESTIČNÍ NÁKLADY .....	65
4.2	PROVOZNÍ NÁKLADY .....	66
4.2.1	<i>Stanovení provozních ztrát kompenzačních rozvaděčů.....</i>	66
4.3	ÚSPORY.....	70
4.3.1	<i>Snížení činných ztrát.....</i>	70
4.3.2	<i>Úspora za případnou přírážku za nedodržení účinníku.....</i>	72
4.4	VÝPOČET NÁVRATNOSTI .....	73
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>76</b>
	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>

## Úvod

Předkládaná práce řeší návrh kompenzačních prostředků v zadané oblasti rozvodné sítě vodního hospodářství v areálu papíren Mondi Štětí a.s.

Všichni velkoodběratelé jsou ze zákona povinni odebírat z distribuční soustavy elektrickou energii s účinníkem v rozmezí 0,95 až 1,00 induktivního charakteru, pokud ve smlouvě dodavatele (provozovatele distribuční soustavy) s odběratelem (zákazníkem) nebylo dohodnuto jinak. V této smlouvě je dále stanovena i cena elektrické energie. V případě, že odběratel nedodrží závaznou hodnotu účinníku, zaplatí provozovateli distribuční soustavy cenu za nedodržení účinníku vycházející z přírážky stanovené Energetickým regulačním úřadem. V případě velmi nízkého účinníku, může tato přírážka dosahovat i 100 %. Důvodem takových sankcí je zejména skutečnost, že v případě odběru elektrické energie s nižším účinníkem se zvyšuje zdánlivý proud, který takovým vedením protéká. Následkem jsou i vyšší ztráty ve vedení apod.

Velkoodběratelé ve většině případů napájí zařízení, které neodebírání elektrickou energii s ideálním účinníkem, musí tedy zvážit, zda nevybavit rozvodnou soustavu tzv. kompenzačním zařízením. Zjednodušeně se jedná o paralelně připojené kondenzátorové baterie, které dodají potřebný jalový výkon přímo v podnikové síti, tím odběratel dosáhne závazného účinníku odebrané elektrické energie bez hrozby postihu.

V první kapitole této práce jsou shrnuty a vysvětleny důvody kompenzace účinníku a základní pojmy pro pochopení problematiky. V druhé kapitole je popsáno rozdělení umístění kompenzačních zařízení a technické možnosti kompenzace. Třetí kapitola je věnována návrhu jednotlivých variant kompenzace účinníku odběratele v zadané části průmyslového rozvodu. Poslední část se zabývá ekonomickou rozvahou variant navrhované kompenzace účinníku.

## Seznam symbolů a zkratk

$A_\varepsilon$	(Wh)	odebraný činný výkon
$A_j$	(Wh)	odebraný jalový výkon
$C$	(F)	kapacita kondenzátoru
$CF$	(Kč)	peněžní tok ( <i>Cash Flow</i> )
$C_E$	(Kč/kWh)	cena elektrické energie
$C_p$	(Kč)	přirážka za nedodržení účinníku
$\cos\varphi$	(-)	účinník
$\cos\varphi_0$	(-)	účinník naprázdno
ČSN		Česká státní norma
ČOV		čistírna odpadních vod
$D$	(VA)	deformační výkon
$DCF$	(Kč)	diskontovaný peněžní tok
$f$	(Hz)	frekvence
$f_n$	(Hz)	frekvence sítě
$f_r$	(Hz)	rezonanční frekvence
$h$	(-)	řád harmonické
HDO		hromadné dálkové ovládání
$I_{CN}$	(A)	jmenovitý proud kondenzátoru
$I_{0,98}$	(A)	proud po kompenzaci
$k$	(-)	konstanta převodu účinníku nekompenzovaného asynchronního motoru
$l$	(m)	délka
$L$	(H)	indukčnost
nn		nízké napětí
$NPV$	(Kč)	čistá současná hodnota ( <i>Net Present Value</i> )
$p$	(-)	činitel ztlumení
$P$	(W)	činný výkon
$P_{max}$	(W)	čtvrthodinové maximum odběru elektrické energie
$Q$	(var)	jalový výkon
$Q_c$	(var)	výkon kompenzačního kondenzátoru
$Q_i$	(var)	instalovaný kompenzační výkon
$Q_k$	(var)	jalový výkon po kompenzaci
$Q_{kom}$	(var)	potřebný kompenzační výkon

$Q_{kom/7\%}$ (var)	kompenzační výkon se 7% ztlumením
$Q_n$ (var)	kompenzační výkon jednoho stupně
$Q_0$ (var)	jalový výkon při chodu naprázdno
$r$ (%)	diskontní úroková míra
$R$ ( $\Omega$ )	odpor
$R_K$ ( $\Omega/m$ )	činný odpor kabelu na jednotku délky
RC	rozvaděč kompenzační
RM	rozvaděč pro napájení technologických zařízení
RO	rozvaděč pro napájení osvětlení
rVN	rozvaděč vysokonapěťový
$S$ (VA)	zdánlivý výkon
$t$ (rok)	doba životnosti
$tg\delta$ (-)	ztrátový úhel
$U_{CN}$ (V)	jmenovité napětí kondenzátoru
$u_k$ (%)	jmenovité napětí nakrátko
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
$X$ ( $\Omega$ )	reaktance
$X_C$ ( $\Omega$ )	kapacitní reaktance
$X_L$ ( $\Omega$ )	induktivní reaktance
$Z$ ( $\Omega$ )	impedance
$\omega$ ( $s^{-1}$ )	úhlová rychlost
$\lambda$ (-)	opravdový účinník

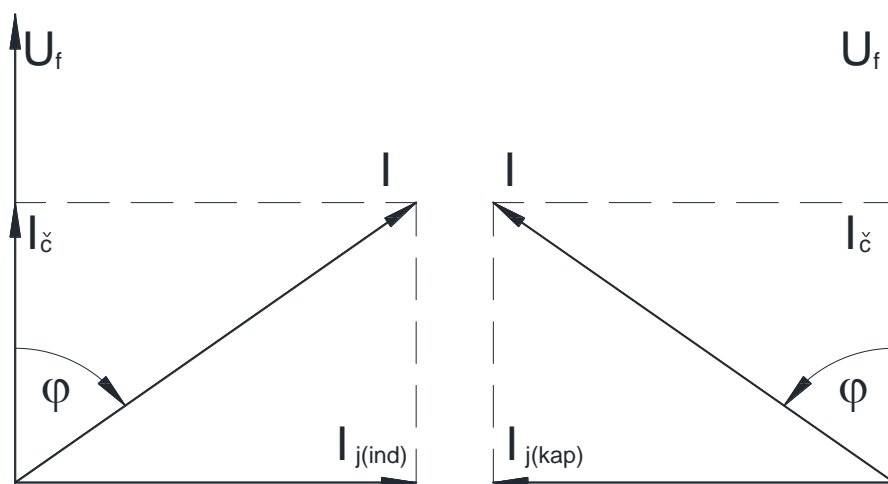
# 1 Teorie kompenzace účinníku

## 1.1 Základní pojmy

V silnoproudé rozvodné soustavě se setkáváme s různými druhy spotřebičů elektrické energie. První skupinu tvoří spotřebiče, které mají čistě činný charakter. Těmi jsou např. žárovky, odporová topidla, vařiče, sporáky a podobně. Elektrické spotřebiče, které potřebují ke své práci magnetické pole, způsobují odklon fázoru proudu od napětí, takže odebírají ze sítě jalovou složku proudu induktivního charakteru. Takovými spotřebiči jsou např. transformátory, elektromotory, indukční pece a ostatní indukční spotřebiče. Poslední skupinu spotřebičů tvoří spotřebiče kapacitního charakteru, u kterých je fázor proudu posunut o  $90^\circ$  před napětím. Jsou to např. kondenzátory nebo dlouhá kabelová vedení.

Ve velkých průmyslových provozech převládá zátěž induktivního charakteru, zejména asynchronních elektromotorů. Induktivní (jalová) složka proudu nekoná činnou práci a tím zbytečně zatěžuje jak zdroje, tak i distribuční síť. Proto je nutné velikost této jalové složky proudu vhodným způsobem omezit nebo vykompenzovat.

Obr. 1 znázorňuje fázorový diagram napětí, proudu a fázového posuvu u induktivních a kapacitních spotřebičů.



Obr. 1 Fázorový diagram [1]

Z obrázku je patrné, že jalová složka proudu u induktivních a kapacitních spotřebičů je v protifázi. Proto jejich vhodným řazením můžeme docílit stavu, kdy jalová složka proudu bude minimální nebo dokonce nulová. Tohoto poznatku využíváme při kompenzaci jalového proudu nebo výkonu. [1]

### 1.1.1 Činný výkon

Je definován jako střední hodnota okamžitého činného výkonu:

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi = U_f \cdot I \cdot \cos\varphi = U_f \cdot I_\xi \quad (\text{W}) \quad (1)$$

Pro trojfázovou soustavu můžeme psát:

$$P = S \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_\xi \quad (\text{W}) \quad (2)$$

Činný výkon je fyzikálně mírou elektrické energie, která se ve spotřebiči nevratně převádí na jiný druh energie (např. na tepelnou, mechanickou). [3]

### 1.1.2 Jalový výkon

Je definován jako amplituda okamžitého jalového výkonu; pro trojfázovou soustavu můžeme psát:

$$Q = S \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_j \quad (\text{var}) \quad (3)$$

Jalový výkon je fyzikálně mírou elektrické energie akumulárních prvků spotřebiče tzn., že spotřebič výkon střídavě dodává a spotřebovává. Střední hodnota okamžitého jalového výkonu je nulová. [3]

### 1.1.3 Zdánlivý výkon

Je definován jako amplituda harmonické složky okamžitého činného výkonu, pro trojfázovou soustavu můžeme psát:

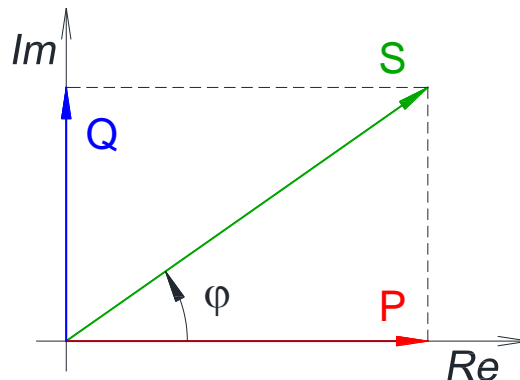
$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \frac{P}{\cos\varphi} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{VA}) \quad (4)$$

Zdánlivý výkon zahrnuje činný a jalový výkon a zavádíme ho z výpočtových důvodů, kdy se podle něj provádí dimenzování vedení, transformátorů, přípojnic apod. Platí pro situaci, kdy uvažujeme pouze první harmonickou. [3]

### 1.1.4 Účinník

Je definován jako cosinus fázového posunu mezi napětím a proudem první harmonické. Jedná se o bezrozměrnou veličinu označovanou jako  $\cos\varphi$ . [3]

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (-) \quad (5)$$



Obr. 2 Trojúhelník výkonů

### 1.1.5 Deformační výkon

V neharmonickém ustáleném stavu nelze uvažovat s jednoduchým trojúhelníkem výkonů, uvažujeme vztah [6]:

$$S \geq P^2 + Q^2 \quad (\text{VA}) \quad (6)$$

Deformační výkon, obdobně jako výkon jalový, představuje neúčinnou složku zdánlivého výkonu, vyvolávajícího nárůst ztrát v napájecí síti a snížení její využitelnosti. Zdánlivý výkon respektující deformační výkon se udává ve tvaru:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{VA}) \quad (7)$$

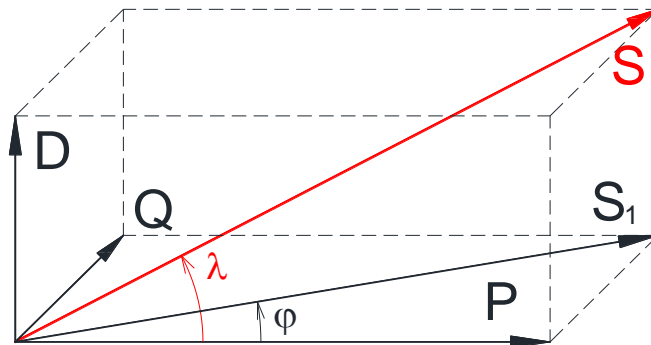
Odvozením získáváme deformační výkon:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (\text{VA}) \quad (8)$$

### 1.1.6 Opravdový účinník

Opravdový účinník respektuje deformační výkon a tím i vliv harmonických proudů a napětí [6]:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (-) \quad (9)$$



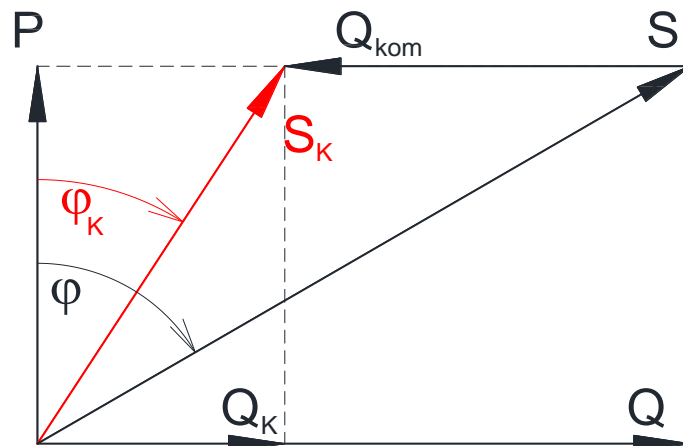
Obr. 3 Diagram složek výkonů [6]

### 1.2 Význam kompenzace účinníku

Při stále větší spotřebě elektrické energie vstupují do popředí snahy nalézt způsoby, jak snížit ztráty při přenosu a rozvodu elektrické energie. Nejpoužívanějším zdrojem úspory elektrické energie v průmyslu je kompenzace účinníku, protože zde převládá spotřeba induktivního charakteru. A to z důvodu, že nejčastěji používaným spotřebičem je asynchronní motor.

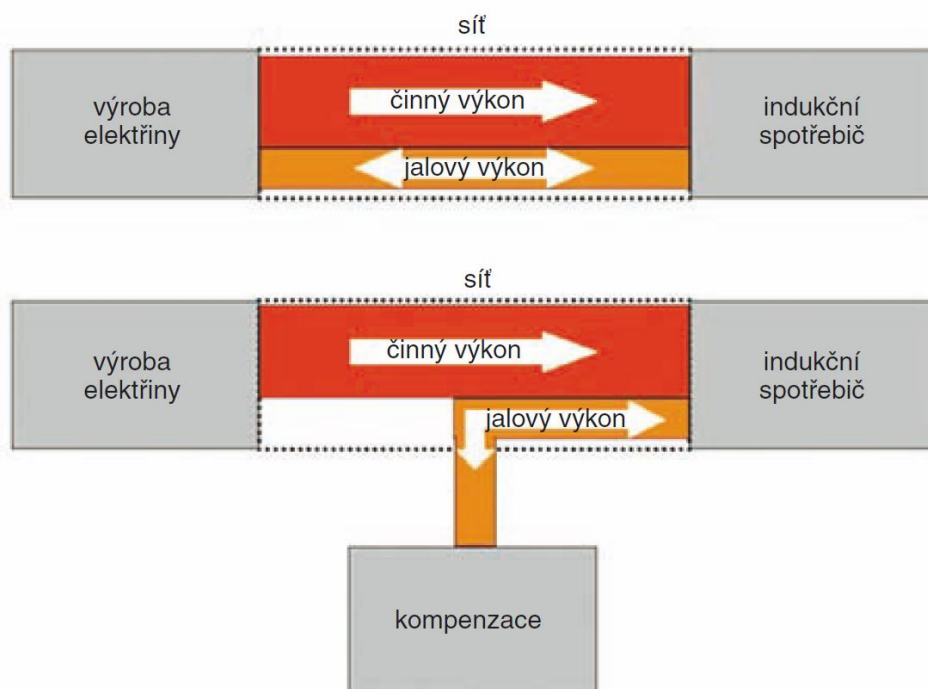
K tomu, aby byla v motoru činná složka elektrické energie přeměněna na práci, musí motor ze sítě odebírat i jalovou složku nezbytnou k vytvoření elektromagnetického pole v motoru. Přívodní vedení ke spotřebiči je pak zatěžováno oběma složkami proudu. Rozvodná zařízení se tedy musí dimenzovat na hodnotu zdánlivého proudu. Přenos jalového proudu zvyšuje jak úbytky napětí, tak i činné ztráty v rozvodu, které jsou úměrné druhé mocnině protékajícího proudu. Pro snížení velikosti zdánlivého (přenášeného) proudu je výhodná výroba jalového proudu (výkonu) v blízkosti induktivního spotřebiče. Takováto výroba se nazývá kompenzace účinníku, nebo také kompenzace jalového výkonu.





Obr. 4 Účinek kompenzace účinníku – fázorový diagram [4]  
 $S_k$  .. zdánlivý výkon po kompenzaci,  $\varphi_k$  .. fázový posuv po kompenzaci  
 $Q_{kom}$  .. kompenzační výkon,  $Q_k$  .. spotřebovaný jalový výkon po kompenzaci

Kompenzace účinníku se provádí paralelním připojením kompenzačního zařízení k spotřebiči. Ke kompenzaci jsou využívány kondenzátory, synchronní kompenzátory, popř. aktivní filtry. Vliv kompenzace se projevuje jen v části soustavy mezi zdrojem a místem připojení kompenzačního zařízení viz obr. 5, avšak účinník spotřebiče zůstává i po kompenzaci nezměněn. [4]

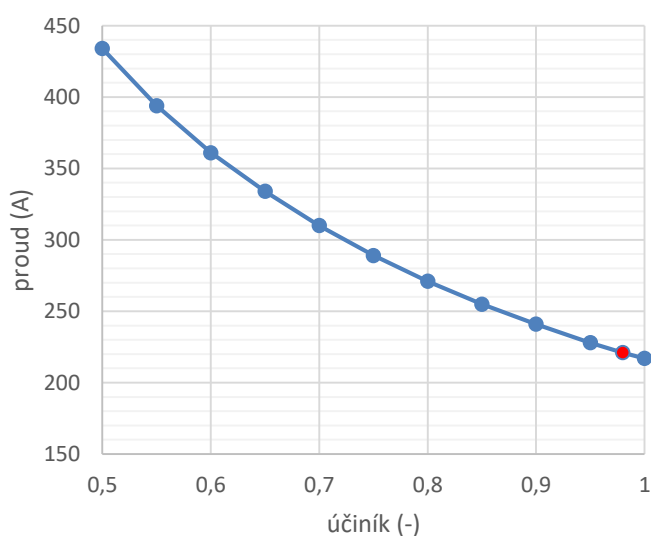


Obr. 5 Vliv kompenzace na síť [11]

### 1.2.1 Důsledky špatného účinníku

- Snížení využití stávajících rozvodných elektrických zařízení (tj. nižší přenášený činný výkon).
- Zvýšení pořizovacích nákladů všech zařízení, dimenzovaných podle velikosti zdánlivého výkonu, jako jsou například transformátory, vypínače a další spínací zařízení, jistící přístroje a ochrany, měřicí přístroje apod.

Dimenzování zařízení na proudy bez kompenzace, vede ke zvýšení pořizovacích nákladů na rozvodná zařízení (např. při účinníku 0,8 jsou pořizovací náklady vyšší zhruba o 10 %, při účinníku 0,6 o 45 % a při účinníku 0,5 o 71 % než při účinníku 1).



Obr. 6 Ilustrativní graf vlivu účinníku na odebíraný proud u spotřebiče 150 kW (červený bod – požadavek energetika, účinník 0,98 a proud 221 A)

- Zvýšení ztrát v rozvodu elektrické energie (tj. ztrátový výkon je přímo závislý na velikosti druhé mocniny jalového výkonu).
- Zvýšení úbytků napětí v rozvodu elektrické energie (tj. zvýšení kolísání napětí v elektrizační soustavě).
- Špatný účinník má nepříznivý vliv i na práci v elektrizační soustavě, zhoršuje spolupráci mezi elektrárnami při předávání velkých jalových výkonů, zhoršuje stabilitu přenosu elektrické energie, snižuje účinnost alternátorů, transformátorů a dalších zařízení.

Uvedené důsledky mají vliv i na velikost sazby za spotřebovanou elektrickou energii, neboť provozovatelé distribuční soustavy uplatňují finanční postih velkoodběratelům, kteří odebírají elektrickou energii se špatným účinníkem. [1]

## 1.2.2 Výhody kompenzace účinníku

- Lepší využití rozvodných zařízení a z toho vyplývající oddálení investic do nových rozvodných zařízení.
- Snížení přenosových ztrát ve vedeních a transformátorech  $\Delta P \sim R I^2$ .
- Zlepšení napěťových poměrů  $\Delta U \sim I$ .
- Zlepšení zkratových poměrů v síti (nižší budicí napětí generátoru související s menším požadavkem na výrobu jalové energie, má za následek i nižší nárazové a trvalé zkratové proudy v síti)
- Odlehčení generátorů, resp. budičů, které jsou zdrojem jalové energie.
- Snížení rizika penalizace, případně je možno docílit snížení sazby, bonifikace za odebranou elektrickou energií. [4]

Z toho vyplývá velký význam účinníku zejména v průmyslových závodech. Proto je třeba věnovat kompenzaci účinníku náležitou pozornost. [1]

Často lze zlepšit účinník i bez dodatečné kompenzace provedením těchto opatření:

- Použití synchronních motorů místo asynchronních (vhodné pro výkony motorů 100 kW a více s trvalým chodem, buzením motoru lze měnit odebíraný jalový výkon ze sítě).
- Nahrazení málo zatížených motorů motory o menším výkonu (potřeba jalového výkonu se zvyšuje s rostoucím výkonem motoru a je přibližně stejná, ať je motor zatížen úplně, částečně nebo vůbec. Předdimenzované motory i transformátory pracují s nízkým účinníkem). Pracující stroje s nízkým účinníkem, např. nezatížené transformátory představují téměř čistou jalovou zátěž s účinníkem 0,1 až 0,2).
- Připojení málo zatížených motorů na nižší napětí. [4]

## 1.3 Spotřebiče jalového výkonu

### 1.3.1 Asynchronní motory

Asynchronní motory patří mezi nejrozšířenější spotřebiče elektrické energie, zejména v průmyslu tvoří cca 70 % celkového instalovaného výkonu. Dominantní zastoupení mají motory s kotvou nakrátko. Jalovou energii potřebují asynchronní motory k vytvoření točivého magnetického pole statoru a k pokrytí rozptylového magnetického toku. Štítkový údaj účinníku se vztahuje ke jmenovitému zatížení, hodnota závisí na konstrukci motoru

(např. kroužkové motory nebo pomaloběžné mají horší účinník oproti motorům s kotvou nakrátko nebo rychloběžným). Podstatné je zvětšení odebíraného jalového výkonu a zhoršení účinníku s klesajícím zatížením motoru, zvláště při chodu naprázdno (60 – 70 % příkonu motoru při plném zatížení). [2]

Tab. 1. Příklad rozdílného účinníku pro motor Siemens 1LG6, 22kW [14]

Označení	Velikost	Jmen. otáčky (min <sup>-1</sup> )	účinník při zatížení P	
			75% P <sub>n</sub>	100% P <sub>n</sub>
1LG6 183-2MA..	180 M	2955	0,86	0,88
1LG6 186-4MA..	180 L	1465	0,80	0,84
1LG6 207-6AA..	200 L	978	0,78	0,82
1LG6 223-8AB..	225 M	730	0,75	0,81

Celkový odebíraný jalový výkon  $Q$  je tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno  $Q_0$  a z proměnného jalového výkonu  $Q_Z$ , který se zvyšuje s druhou mocninou poměrného zatížení motoru, tj.:

$$Q = Q_0 + Q_Z \cdot \left(\frac{P}{P_N}\right)^2 \quad (\text{var}) \quad (10)$$

kde  $P_N$  je jmenovitý výkon motoru. [13]

### 1.3.2 Asynchronní generátory

Asynchronní generátory odebírají z rozvodné sítě značný jalový indukční výkon pro „nabuzení generátoru“, tj. vytvoření magnetického pole. [13]



Obr. 7 Asynchronní generátor větrné elektrárny [16]

### 1.3.3 Transformátory

U transformátorů je odebíraný jalový výkon  $Q$  tvořen jalovým výkonem chodu naprázdno  $Q_0$ , (asi 1 – 3,5 % jmenovitého výkonu transformátoru) a proměnným jalovým výkonem pro pokrytí rozptylového magnetického toku, který se zvyšuje s druhou mocninou zatížení transformátoru, tj.:

$$Q = Q_0 + u_k \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 \cdot S_N \quad (\text{var}) \quad (11)$$

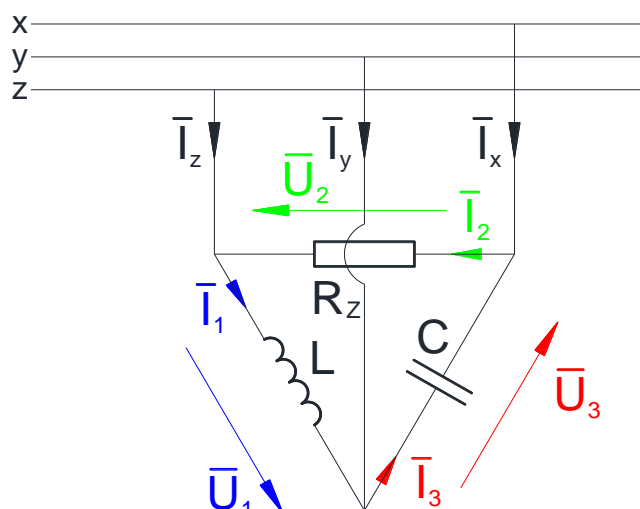
kde  $S_N$  je jmenovitý výkon a  $I_N$  jmenovitý proud transformátoru.

Hodnota účinníku při chodu transformátoru naprázdno je velmi nízká,  $\cos\varphi_0 = 0,1 - 0,2$ , tj. čistě jalové zatížení. Z tohoto důvodu je vyžadována kompenzace jalového proudu transformátorů naprázdno u odběratelů s měřením jalové energie na sekundární straně transformátoru.

Při průměrném zatížení 70 % se celkový jalový výkon transformátoru pohybuje kolem 4 – 6 % jmenovitého výkonu transformátoru. [13]

### 1.3.4 Střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece

Tato zařízení jsou jedna z nejproblematictějších z hlediska jejich zpětných vlivů na síť. Kromě odběrů výkonů s nízkými hodnotami účinníku vykazují velkou proměnlivost odebíraného výkonu, která způsobuje kolísání napětí (blikání, flicker), generování harmonických proudů a nesymetrii odběru. Stabilní hoření a dosažení požadovaného výkonu na oblouku je podmíněno účinníkem mezi 0,7 – 0,86.



Obr. 8 Schéma zapojení symetrizačního zařízení [1]

Symetrizaci odběru jednofázových pecí lze řešit vhodným přidáním tlumivek a kondenzátorů na svorky pece tak, aby tvořily symetrický trojfázový spotřebič zapojený do trojúhelníku. [13]

### 1.3.5 Výkonové polovodičové měniče

Jedná se o řízené a neřízené usměrňovače, měniče frekvence se stejnosměrným meziobvodem (napětovým nebo proudovým), přímé měniče frekvence, fázově řízené střídavé spínače apod.

Různé typy měničů se z hlediska odběru jalového výkonu liší, např. řízený polovodičový usměrňovač pro řízení stejnosměrných motorů pracuje s účinníkem 0,5 i horším, avšak střídač s neřízeným usměrňovačem na vstupu a stejnosměrným napětovým meziobvodem s šířkovou pulsní regulací napětí pro řízení otáček asynchronního motoru může pracovat s účinníkem 0,95. [13]

### 1.3.6 Venkovní a kabelová vedení

Elektrická vedení spotřebují poměrně málo jalové energie, a to vlivem své indukčnosti a kapacity. U venkovních vedení (pod 200 km) převládá indukční složka a kapacitní je zanedbatelná. U kabelových vedení převládá naopak vliv kapacity, která je úměrná průřezu žil. Tato vlastnost kabelových sítí může vést při nesprávně provozovaných kompenzačních zařízeních (tj. trvale překompenzovaných) k nebezpečnému nárůstu kapacitního výkonu hlavně v sítích vn. [13]

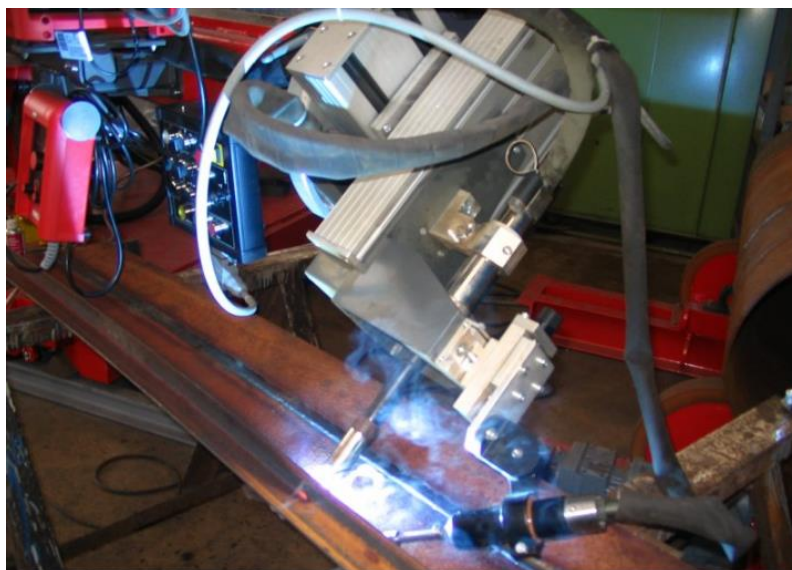
### 1.3.7 Osvětlovací soustavy

Nízkotlaké a vysokotlaké zdroje světla využívající elektrický výboj v plynu potřebují pro svoji činnost udržovat na svých elektrodách vyšší napětí. Toto napětí je zajištěno předřadníkem buď indukčním (tlumivkou), nebo elektronickým.

Účinník odběru bude v případě zapojení s indukčním předřadníkem velmi nízký. U většiny takto zapojených svítidel je účinník v rozmezí 0,37 až 0,5. Z tohoto důvodu jsou svítidla vybavována výrobcem kompenzačním kondenzátorem, který zajišťuje účinník nad úrovní 0,95. [2]

### 1.3.8 Ostatní spotřebiče jalového výkonu

Jedná se např. o svařovací transformátory s rychle se měnícím odebíraným jalovým výkonem (svařovací lisy, bodovky), reaktory pro omezení zkratových proudů, apod. [13]



Obr. 9 Svářecí automat Fronius [15]

### 1.4 Požadavky na kompenzaci jalového výkonu u odběratelů

Odběratelé (s výjimkou odběrů pro domácnosti) musí provést taková opatření, aby odebírali elektrickou energii z veřejné rozvodné soustavy s hodnotou účinníku 0,95 až 1,0 induktivního charakteru, pokud ve smlouvě dodavatele s odběratelem nebylo dohodnuto jinak. [4] Povinnost kompenzovat jalový výkon odebíraný z rozvodných sítí a dále i zamezovat jeho zpětné dodávce je vynucena penalizacemi, právně podpořenými zejména zákonem č. 458/200 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon) a příslušnou sekundární legislativou. Výše úhrad je stanovena každý rok v listopadu Cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu. [17]

Tab. 2. Cenové přírážky za nedodržení účinníku [10]

Pásma účinníku	$tg\varphi_{\min}$	$tg\varphi_{\max}$	$cos\varphi_{\min}$	$cos\varphi_{\max}$	Přirážka
	(-)	(-)	(-)	(-)	
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

Vynucení povinnosti kompenzace je realizováno procentní přírážkou k pořizovací ceně elektrické energie. Pokud se účinník pohybuje v mezích 0,95 – 1,00, neplatí odběratel žádnou cenovou přírážku. Je-li vypočtený účinník podle naměřených hodnot nižší než 0,95, platí zákazník provozovateli distribuční soustavy cenovou přírážku stanovenou podle výše uvedené tabulky. Hodnota  $tg\varphi$  pro určení procentní přírážky za nedodržení účinníku se zaokrouhlí na tři desetinná místa dolů. [10]

V případě nevyžádané dodávky jalové energie do distribuční sítě může být odběratel distribuční společností rovněž sankcionován. Taková dodávka hrozí v případě překompenzování napájecí sítě a je dle rozhodnutí Energetického regulačního úřadu sankcionována částkou 440 Kč/Mvarh. [10]



## 2 Způsoby kompenzace účinníku

Tato kapitola se zabývá základním dělením způsobů kompenzace, jak z hlediska umístění, tak jednotlivých technických prostředků a popisem základních komponentů kompenzace.

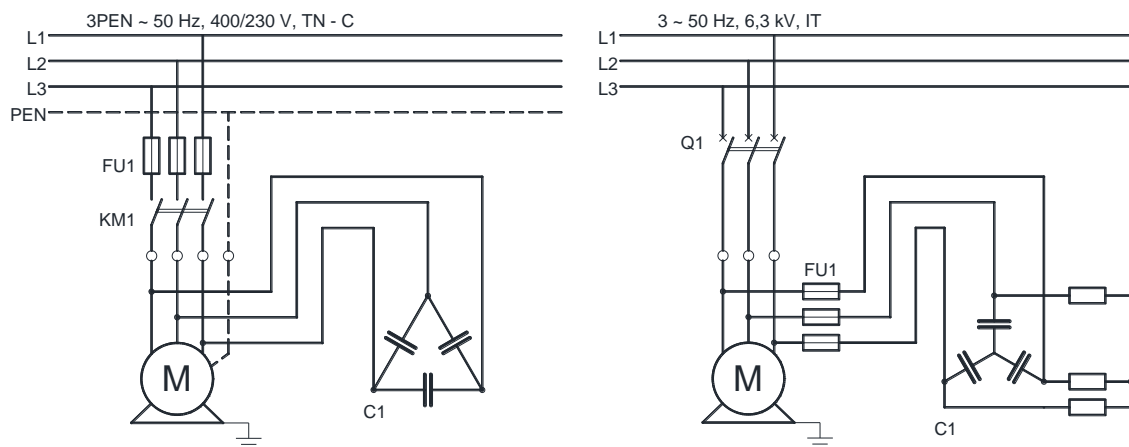
### 2.1 Dělení kompenzace dle umístění

#### 2.1.1 Individuální kompenzace

V případě individuální kompenzace je ke každému spotřebiči přímo připojeno na jeho svorky vlastní kompenzační zařízení. Tím je od jalového výkonu vykompenzováno celé vedení od zdroje až po spotřebič. Tento způsob kompenzace má nejvyšší úsporu ztrát, ale využití kompenzačního prostředku je závislé na provozu kompenzovaného zařízení. Jelikož kompenzace je spínaná zároveň se spotřebičem, nepotřebuje žádné spínací prvky a regulaci (protože kondenzátor je navržen dle potřeby spotřebiče), jedná se o nejjednodušší a provozně nejspolehlivější řešení.

Nevýhodou tohoto řešení jsou zejména vyšší náklady a prostorová náročnost, protože každý spotřebič musí mít ve své blízkosti umístěnou kondenzátorovou baterii. To s sebou nese i náročnější kontrolu a údržbu jednotlivých kondenzátorů. U spotřebičů s měnícím se zatížením hrozí nebezpečí překompenzování.

Používá se většinou u asynchronních motorů nad 5 kW s vyšší dobou využití, u transformátorů z důvodu kompenzace indukčního výkonu naprázdno a pro kompenzaci výbojkových a zářivkových svítidel. Dle ČSN 33 3080 [8] je nutné dávat individuální kompenzaci přednost.



Obr. 10 Zapojení individuální kompenzace [8]

### 2.1.1.1 Individuální kompenzace asynchronního motoru

Asynchronní motor se v běžném provozu pohybuje mezi dvěma hodnotami, a to stavem naprázdno a provozním stavem. Ve stavu naprázdno se projevují zejména satorové a hlavní impedance. V provozním stavu se projevují impedance satorové a rotorové.

Hodnota účinníku se u asynchronního motoru v provozním stavu pohybuje mezi 0,6 a 0,9, kdy záleží zejména na velikosti výkonu motoru a počtu pólů. U nezátíženého motoru nebo při jeho chodu naprázdno bude asynchronní motor pracovat vždy s horším účinníkem, než při chodu se jmenovitým zatížením.

Postupů pro výpočet individuální kompenzace asynchronního motoru je několik, od jednoduchých tabulek až po složitější výpočty. Pro rychlý orientační odhad velikosti potřebného kondenzátoru lze často použít vztah:

$$Q_C = P \cdot k \quad (\text{kvar}) \quad (12)$$

$P$  výkon asynchronního elektromotoru (kW)  
 $k$  konstanta převodu účinníku nekompensovaného asynchronního motoru na  $\cos\varphi = 0,95$  z tabulky 3.

Tab. 3. Konstanta převodu účinníku nekompensovaného asynchronního elektromotoru [2]

cos $\varphi$	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94
k	0,97	0,84	0,69	0,55	0,42	0,29	0,16	0,12	0,09	0,07	0,03

Potřebný kompenzační výkon individuálně připojené kondenzátorové baterie by se měl pohybovat mezi cca 30 – 35 % hodnoty jmenovitého výkonu asynchronního motoru. [2]

### 2.1.1.2 Kompenzace proudu transformátoru naprázdno

V případě, že budeme měřit spotřebu elektrické energie na primární straně transformátoru, je možné vykompenzovat spotřebu jalové energie v rámci kompenzace ostatních spotřebičů, které jsou z tohoto transformátoru napájené. Obvykle se jedná o centrální kompenzaci.

Pokud bude realizováno měření elektrické energie na straně nižšího napětí, připočítává se k naměřenému odběru mimo transformačních ztrát také spotřeba jalové energie dle velikosti a druhu transformátoru. Jalová energie není připočítávána, pokud je na sekundární svorky transformátoru připojený kompenzační kondenzátor o výkonu, který odpovídá příkonu transformátoru naprázdno. Tento kondenzátor je připojen na svorky transformátoru ještě před hlavním jističem rozvaděče. To s sebou nese i několik úskalí. Především je nutné tento kondenzátor patřičně odjistit. Z důvodu velkého zkratového výkonu v místě připojení

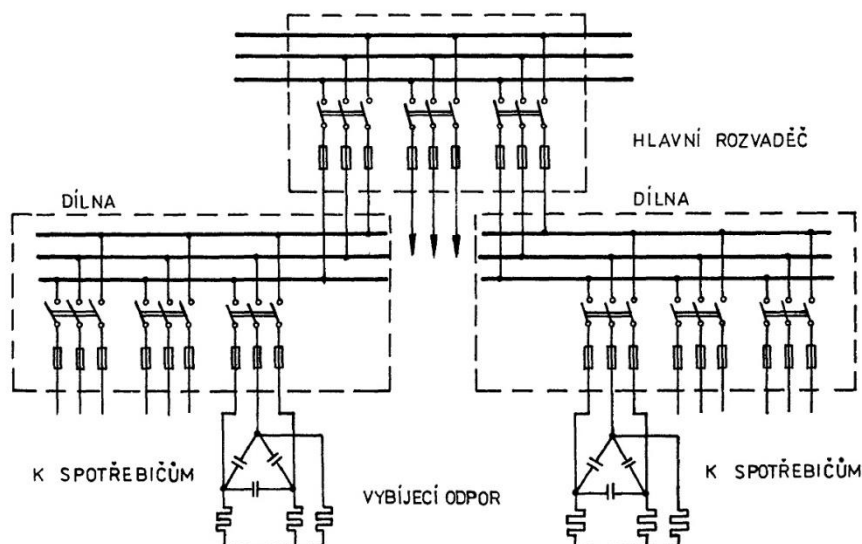
nelze jištění realizovat jističem, ale výkonovými pojistkami. Pro takto připojený kondenzátor hrozí nebezpečí možného vzniku rezonancí a tím jeho přetěžování harmonickými. Tomuto nebezpečí předejdeme, když vhodně navrhne a předřadíme ochrannou tlumivku. [2]

### 2.1.2 Skupinová kompenzace

U skupinové kompenzace jsou kondenzátorové baterie připojeny na přípojnice rozvaděče, který napájí určitou skupinu spotřebičů. V případě použití skupinové kompenzace je od jalového výkonu vykompenzováno vedení od zdroje až po tento rozvaděč. Výhodou tohoto řešení je lepší využitelnost instalovaných kondenzátorových baterií, protože potřebný kompenzační výkon se stanoví z výpočtového zatížení celé skupiny připojených spotřebičů rozvaděče. Kompenzace je v tomto případě instalována v rozvodnách, a tím je docíleno lepšího přístupu pro případnou obsluhu a servis.

Nevýhodou řešení je nevykompenzování vedení od rozvaděče ke spotřebiči, proto musíme prvky a vedení směrem ke spotřebiči instalovat na plné zatížení. Další nevýhodou je nutnost instalace regulátorů jalového výkonu, nutnost jištění a spínání jednotlivých kondenzátorových baterií.

Toto řešení se používá zejména v rozvodech průmyslových podniků u hlavních rozvaděčů na napěťové hladině nn a vn pro kompenzování jalového výkonu menších spotřebičů s nižší dobou využití. [2][4]



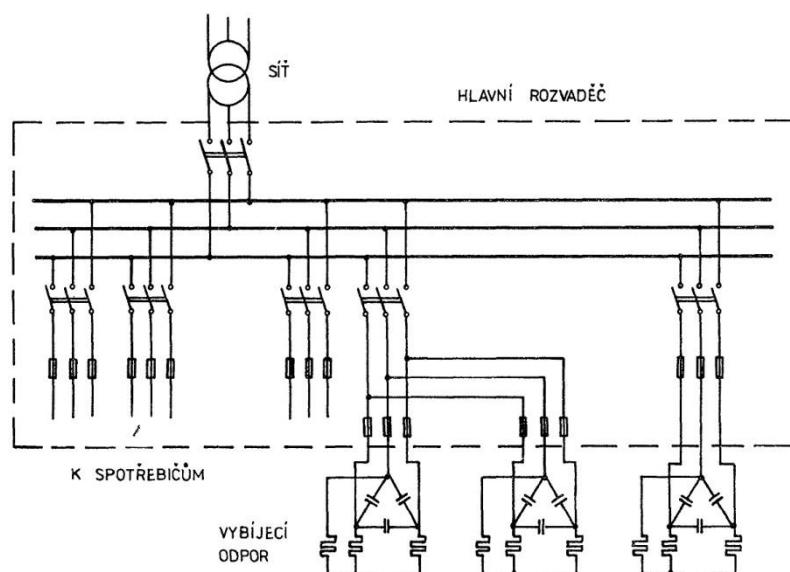
Obr. 11 Ideové schéma zapojení skupinové kompenzace [8]

### 2.1.3 Centrální kompenzace

Centrální kompenzace kompenzuje celý průmyslový podnik a jeho kondenzátorové baterie jsou připojeny k přípojnicím hlavního (vstupního) rozvaděče. Potřebný kompenzační výkon je stejně jako v případě skupinové kompenzace menší.

Nevýhodou je, že rozvod uvnitř podniku (za centrální kompenzací) zůstává nevykompenzován. Dále je opět zapotřebí potřebný regulátor jalového výkonu pro zajištění potřebného účinníku v určených mezích a nutnost jištění a spínání jednotlivých kondenzátorových baterií.

Použití tohoto řešení je zejména v menších průmyslových podnicích s méně proměnlivým zatížením. [2][4]



Obr. 12 Ideové schéma zapojení centrální kompenzace [8]

### 2.1.4 Kombinovaná kompenzace

Kombinovanou kompenzací nazýváme kombinaci předešlých druhů kompenzací. Jedná se o nejrozšířenější druh kompenzace v rozsáhlých průmyslových rozvodech. Při navrhování jednotlivých druhů kompenzace je nutné zohlednit jak ekonomické, tak i technické řešení. [2][4]

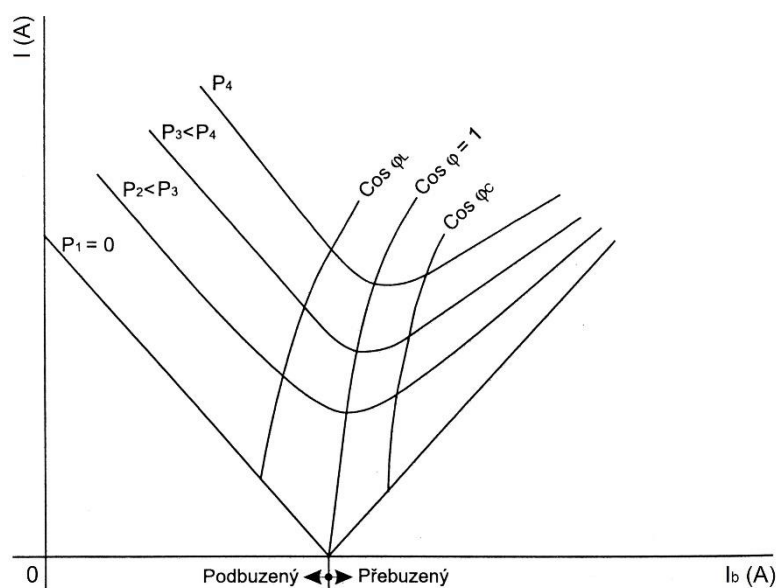
## 2.2 Dělení kompenzace dle technických prostředků

### 2.2.1 Rotační kompenzační zařízení

Mezi tato zařízení patří synchronní kompenzátory a synchronní motory. Vyznačují se zejména tím, že magnetizační energii mu dodává samostatné budící vinutí, které je napájené

ze zdroje stejnosměrného proudu. Synchronní elektromotory se používají zejména v těch aplikacích, kde je zapotřebí stabilní zátěžný moment, tedy nejčastěji pro pohon čerpadel, dmychadel, kompresorů, apod.

Synchronní motor, který pracuje bez mechanického zatížení, se nazývá synchronní kompenzátor. Tento stroj pracuje v režimu naprázdno a z tohoto důvodu ani není mnohdy vyvedena hřídel rotoru. Změnou velikosti budícího proudu lze měnit účinník odběru motoru v oblasti jak induktivní, tak i kapacitní. Na obr. 13 je zobrazena závislost proudu statoru na budícím proudu při stálém výkonu. Tato závislost má tvar tzv. V-křivek.



Obr. 13 V-křivky synchronního stroje [2]

Synchronní kompenzátory jsou konstruovány pro hladiny vn, nejčastěji pro 6 kV. I když budící soupravy synchronních strojů jsou realizovány moderními řízenými usměrňovači ve spojení s rychlými regulátory jalového výkonu, je odezva na případné změny zatížení určitým zpožděním. Synchronní stroje tedy nejsou vhodné ke kompenzaci spotřebičů, u kterých se jejich potřeba na dodávku jalové energie dynamicky mění. Jelikož s provozem synchronních kompenzátorů jsou spojeny nemalé náklady na spotřebu činné energie, údržbu a potřebu většího zastavěného prostoru, jsou tyto kompenzátory nahrazovány kompenzátory statickými.

Synchronní kompenzátory dosahují vysokých jmenovitých výkonů (přibližně od 1 do 15 Mvar), díky pomalejší regulaci jalového výkonu se rotační kompenzátory nejčastěji využívají jako centrální kompenzace rozvodů průmyslových podniků. [2]

## 2.2.2 Statické kompenzátory

Statické kompenzátory nejsou na rozdíl od rotačních kompenzačních zřízení závislé na zdroji činné energie. Statické kompenzátory dělíme do skupin:

- Prostá kompenzace.
- Chráněná kompenzace.
- Kompenzační filtry.
- Aktivní filtry.

### 2.2.2.1 Prostá kompenzace

Jedná se o nejčastější způsob kompenzace účinníku. Kondenzátory nebo kondenzátorové baterie jsou spolu s regulátorem, jistíci a spínacími prvky umístěné do kompenzačního rozvaděče. Kondenzátor, který hodláme použít pro kompenzační účely, musí splňovat tyto hlavní požadavky:

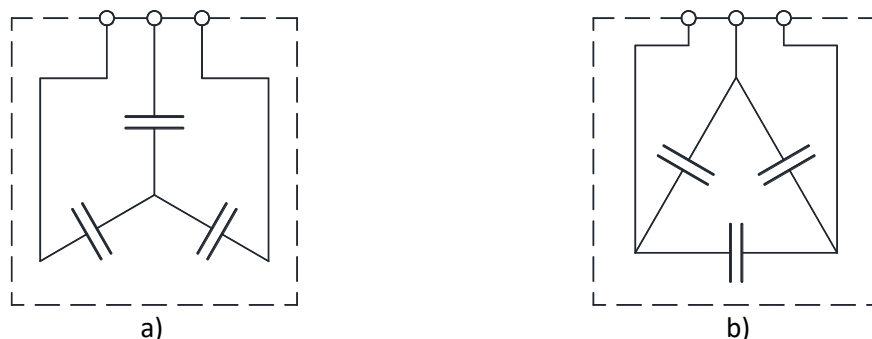
- Tepelnou stabilitu při vysokém jalovém výkonu.
- Odolnost proti přepětí.
- Spolehlivost a bezpečnost provozu.

Po připojení na napětí má jednofázový kondenzátor výkon  $Q_c$  dle vztahu:

$$Q_{C1} = U^2 \cdot 2\pi f \cdot C = U \cdot I_c \quad (\text{var}) \quad (13)$$

$Q_{C1}$	výkon kompenzačního kondenzátoru	(var)
$f$	frekvence sítě	(Hz)
$C$	kapacita kondenzátoru	(F)

Nejčastěji se pro kompenzaci používají trojfázové kondenzátory, které je možné zapojit do hvězdy či do trojúhelníku.



Obr. 14 Zapojení kondenzátoru a) Y, b)  $\Delta$

Pro trojfázový kondenzátor platí:

$$Q_{CY} = 3 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot U_f^2 \quad (\text{var}) \quad (14)$$

$$Q_{C\Delta} = 3 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot U^2 = 3 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot (\sqrt{3} \cdot U_f)^2 \quad (\text{var}) \quad (15)$$

ze vztahů (14) a (15) tedy vyplývá

$$Q_{C\Delta} = 3 \cdot Q_{CY} \quad (\text{var}) \quad (16)$$

Podmínkou platnosti předchozích vzorců je symetrie trojfázového zapojení, tzn. stejné hodnoty všech kondenzátorů. Ze vztahu (16) lze vidět, že v případě zapojení kondenzátoru do trojúhelníku je kompenzační výkon kondenzátoru třikrát větší, než při zapojení do hvězdy. V praxi jsou kondenzátory zapojené do trojúhelníku používány v zařízeních nn, kdy mohou být zapojené na sdružené napětí. Kompenzační zařízení pro vn se z důvodu nižších napěťových nároků zapojuje do hvězdy na fázové napětí.

Kvalitu kondenzátorů ovlivňují ztráty, které jsou reprezentovány tangentou ztrátového úhlu  $tg \delta$ . Zde jsou zahrnuté např. ztráty dielektrika, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů, spojů atd. Ztrátový úhel  $tg \delta$  udává poměr mezi ekvivalentním sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při specifikovaném sinusovém napětí a kmitočtu. Pokud vycházíme ze sinusového průběhu napětí, lze celkové ztráty kondenzátoru stanovit z rovnice:

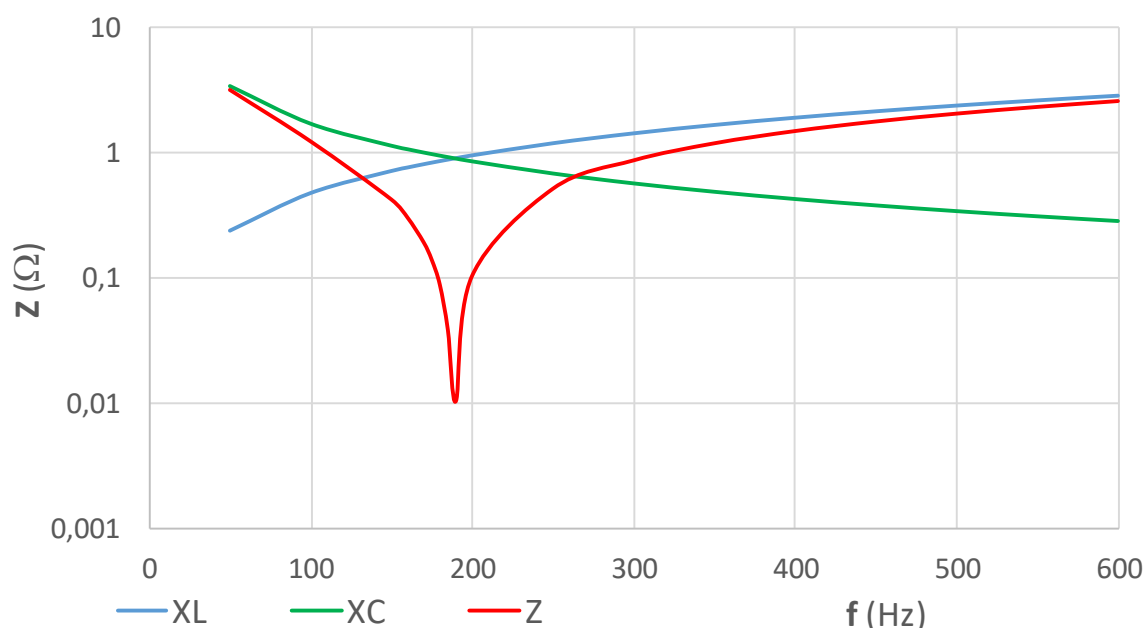
$$P_Z = Q_C \cdot tg \delta \quad (\text{W}) \quad (17)$$

Tangentu ztrátového úhlu ovlivňuje nejen technologie výroby kondenzátoru, ale závisí i na jeho provozní teplotě. Ztrátový úhel se zvyšuje nejen s rostoucí teplotou, ale také s teplotou klesající pod 0 °C. Jednou z významných vlastností kondenzátoru je jeho frekvenční závislost impedance. V případě neharmonického průběhu tedy musíme uvažovat ztráty, které pochází od všech harmonických.

Prosté kondenzátory můžeme použít pro kompenzaci jalového výkonu v sítích nízkého a vysokého napětí, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů není větší než 10 až 15 % výkonu napájecího transformátoru. [2]

### 2.2.2.2 Chráněná kompenzace

Použití chráněné kompenzace je nejčastěji využíváno v průmyslových sítích, které napájí spotřebiče generující harmonické proudy. V případě použití prostých kondenzátorů hrozí, že může dojít k sériové rezonanci mezi kompenzačním kondenzátorem a reaktancí sítě. Pokud bude rezonanční kmitočet takového obvodu blízký pro některé harmonické vyskytující se v síti, může dojít k deformaci průběhu napětí v místě připojení a zároveň i k proudovému a napěťovému přetížení kompenzačních kondenzátorů. Rezonancím lze zabránit tím, že se kondenzátorům předradí ochranná tlumivka. Tímto opatřením dojde k přeladění sériového obvodu reaktance sítě – kondenzátor s tlumivkou na jiný kmitočet, který nebude shodný s kmitočtem některé harmonické vyskytující se v síti. [4]



Obr. 15 Frekvenční charakteristika sériového rezonančního obvodu [2]

Jednotlivý stupeň kompenzátoru je tvořen sériovým spojením kompenzačního kondenzátoru a ochranné tlumivky. Tím vzniká jednoduchý RLC obvod, jehož rezonanční kmitočet je:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{Hz}) \quad (18)$$

Ochranná tlumivka v takovém obvodu musí být navržena tak, aby rezonanční kmitočet byl s dostatečnou rezervou nižší než kmitočet nejnižší harmonické, která se v síti vyskytuje (obvykle pod 200 Hz).

Z charakteristiky na obr. 15 je patrné, že pro kmitočet nižší než  $f_r$  má obvod charakter kapacitní a tedy i kompenzační účinek. Pro kmitočet, který je vyšší než rezonanční má obvod



induktivní charakter. Impedance obvodu s rostoucím kmitočtem roste, a tím dochází ke snižování harmonických proudů.

Kromě vztahu pro rezonanci zavádíme činitel ztlumení  $p$ , který se udává v poměrných jednotkách nebo v procentech.

$$p = \frac{1}{h^2} = \frac{X_L}{X_C} \quad (-) \quad (19)$$

kde  $h$  je řád harmonické, který je dán poměrem rezonanční frekvence  $f_r$  a frekvencí sítě  $f_n$ .

$$h = \frac{f_r}{f_n} \quad (-) \quad (20)$$

Ochranné tlumivky se používají za podmínky, že  $X_L \ll X_C$ . Reaktance kompenzačního článku je dána vztahem (21) a při  $f < f_r$  je nižší než výchozí reaktance kondenzátoru.

$$X_{LC} = X_C - X_L = (1 - p) \cdot X_C \quad (\Omega) \quad (21)$$

Kompenzační kondenzátory se v sítích nn většinou optimalizují na napětí  $U_{CN} = 440$  V, čímž je respektováno zvýšení napětí vlivem reaktance předřazených tlumivek. Hodnotu reaktance určíme z udané hodnoty reaktivního výkonu pro všechny fáze:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} \quad (\Omega) \quad (22)$$

Při návrhu rezonančního kmitočtu kompenzačního kondenzátoru a ochranné tlumivky musíme vzít do úvahy i kmitočet signálu hromadného dálkového ovládání (HDO) v dané lokalitě. V případě, že by rezonanční kmitočet byl blízký kmitočtu HDO, bude LC obvod pro kmitočet HDO představovat velmi malou impedanci a signál HDO bude ze sítě odsáván. [2][4][6]

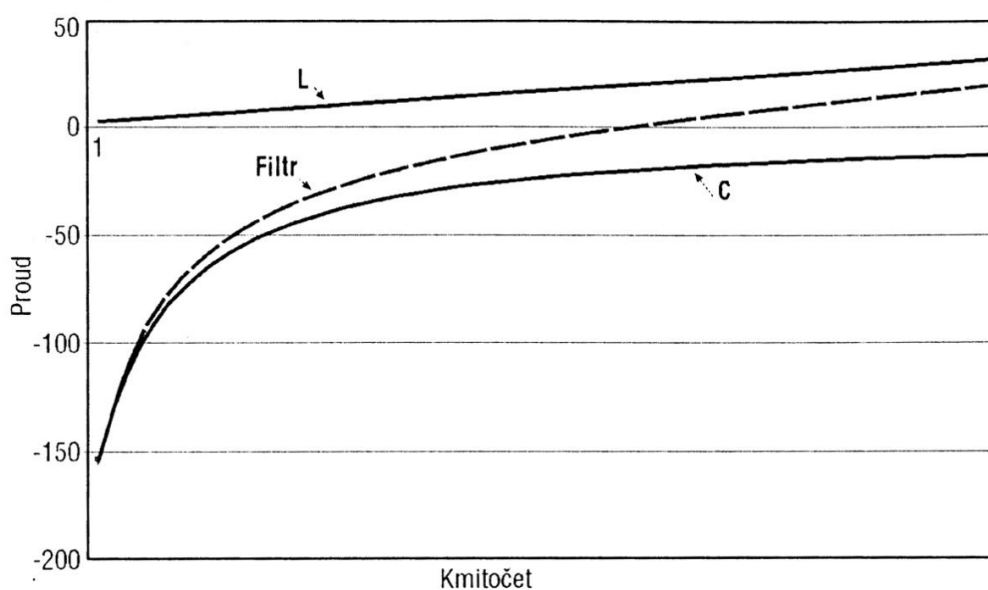
### 2.2.2.3 Kompenzační filtry

Kompenzační filtry se využívají v sítích, kde je vysoký obsah harmonických a zároveň je třeba jejich filtrace. Jedná se například o provozy s pohony s polovodičovými měniči nebo obloukové pece. Tento kompenzační filtr je stejně jako chráněná kompenzace tvořen rezonančním obvodem, který je ovšem laděn velmi blízko charakteristické harmonické. Při průchodu zvolené harmonické, dojde k poklesu impedance na hodnotu velmi blízkou nule a k odsávání harmonické ze sítě. V tom je rozdíl oproti chráněné kompenzaci, kde jsme tlumivkou chránili zejména kondenzátor před průchodem

harmonických proudů. Vhodným návrhem parametrů filtru lze zvětšit či potlačit kompenzační nebo filtrační účinek, avšak jednotlivé účinky nelze od sebe rozdělit. Takovýto kompenzační filtr je tvořen sériovým rezonančním obvodem RLC, impedance tohoto obvodu je dána vztahem:

$$\hat{Z} = R + j\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right) \quad (\Omega) \quad (23)$$

Z obr. 16 je zřejmé, že se kompenzační filtr chová pro kmitočty nižší než  $\omega_r$  jako kondenzátor. Pro harmonickou, na kterou je naladěn představuje v ideálním případě zkrat a pro vyšší kmitočty než  $\omega_r$  se chová kompenzační filtr jako tlumivka.



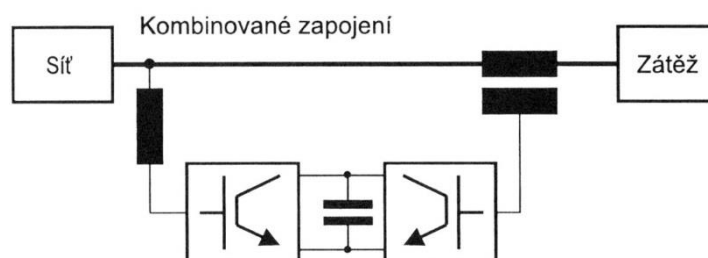
Obr. 16 Kmitočtová charakteristika LC filtru [2]

V praxi se setkáváme s filtry, jejichž stupně jsou laděny na jednotlivé harmonické, vyskytující se ve spektru proudu kompenzovaného spotřebiče. Tyto stupně je nutné připínat vzestupně, to znamená, že jako první se připne filtr naladěný na nejnižší kmitočet. Odepínání jednotlivých stupňů musí probíhat opačným způsobem. V případě, že bychom nejprve připojili filtr, který je naladěný na harmonickou nejvyššího řádu, byl by tento filtr pro harmonické proudy nižších řádů kapacitní reaktancí a tím by mohlo dojít k nežádoucí paralelní rezonanci s reaktancí napájecí sítě. Tato rezonance by mohla mít za následek zvýraznění některé harmonické složky napětí a tím i výraznou deformaci napětí.

Stejně jako u chráněných kompenzací je při návrhu filtru potřeba uvažovat lokální podmínky signálu hromadného dálkového ovládní (HDO). [2][4][6][9]

#### 2.2.2.4 Aktivní filtry

Kromě kompenzace účinníku jsou aktivní filtry další možností efektivního omezení složek harmonických v síti. Základem aktivního filtru je generátor vyrábějící inverzi zbytkové křivky. Po připojení tohoto generátoru na síť zůstane v síti pouze základní harmonická. Aktivní filtry jsou paralelně nebo sériově zapojené generátory, které jsou vhodně řízené tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Podle způsobu zapojení aktivního filtru do sítě lze potom vylepšit proud, napětí, popř. obojí. Dle těchto požadavků dělíme aktivní filtry na paralelní, sériové a kombinované. [2]



Obr. 17 Příklad řazení kombinovaného aktivního filtru [2]

### 2.3 Komponenty kompenzačních zařízení

#### 2.3.1 Regulátory jalového výkonu

Regulátory jsou velice důležitou součástí kompenzačního zařízení. Každá aplikace a každý typ kompenzačního zařízení vyžadují jiný typ regulátoru. Ty se od sebe liší rychlostí reakce, vstupy a výstupy, principem zajišťování potřebného kompenzačního výkonu atd.

##### 2.3.1.1 Eletromechanické regulátory

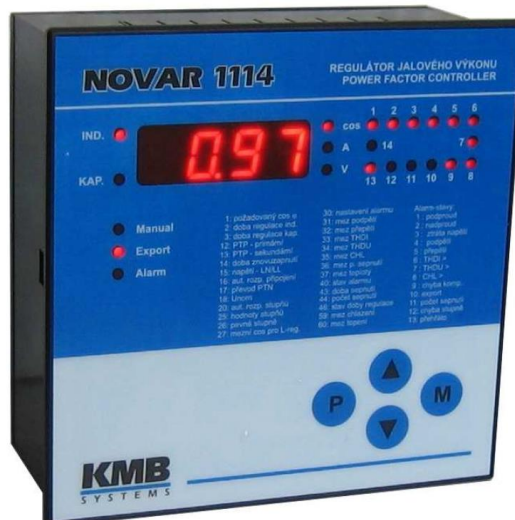
Jde o historicky nejstarší regulátory jalového výkonu, dnes již prakticky nejsou využívány. Typickým zástupcem byl regulátor typu WOR, který se vyráběl ve třech velikostech pro dva, čtyři nebo osm regulačních stupňů. Pro zvětšení regulačních stupňů o další čtyři stupně se doplnil regulátor přídavnou skříňkou. Regulátor obsahoval měřicí článek, časový článek a pomocná relé. Hnací soustava měřicího i časového článku byla indukční, s jednou soustavou elektroměrového typu. Měřicí článek byl uspořádán jako kontaktní wattmetr na měření jalového výkonu a je připojen k síti jedním měřicím transformátorem proudu  $x/5$  A. Napěťová soustava byla připojena přímo na napětí 380 V, popř. přes měřicí transformátor napětí  $x/100$  V. Regulátor nebyl schopný reagovat na rychle se měnící zátěž. [12]

### 2.3.1.2 Analogové regulátory

Generační nástupce elektromechanických regulátorů. Jednalo se například o regulátor typu RQ 5, který se používal pro stupňovou kontaktní kompenzaci. Většina analogových regulátorů pracuje na principu, že z křivky napětí jsou odvozeny průchody nulou a v těchto okamžicích je změřena hodnota proudu  $I_x$ . Za předpokladu sinusového průběhu obou veličin je hodnota proudu  $I_x$  hodnotou jalového proudu. Velkou nevýhodou je velká citlivost na deformace průběhu napětí a proudu, kdy regulátor měří nepřesně a jeho regulační povely jsou zmatené. [2]

### 2.3.1.3 Číslicové regulátory

S rozvojem a zlevňováním mikroprocesorové techniky se na trhu uplatňují číslicové regulátory, které měří skutečné hodnoty napětí a proudu, využívají regulačních algoritmů, které chrání kompenzovaný uzel sítě před okamžitým překompenzováním. Lze s nimi provádět harmonickou analýzu proudu, který teče do kompenzátoru a tím kompenzátor ochránit před přetížením harmonickými proudy. Tyto moderní regulátory používají takzvané kruhové spínání, kdy se vypíná vždy nejdéle zapnutý stupeň a zapíná vždy nejdéle vypnutý stupeň. Tím je docíleno rovnoměrného zatížení kompenzačních prvků a spínačů. [2]



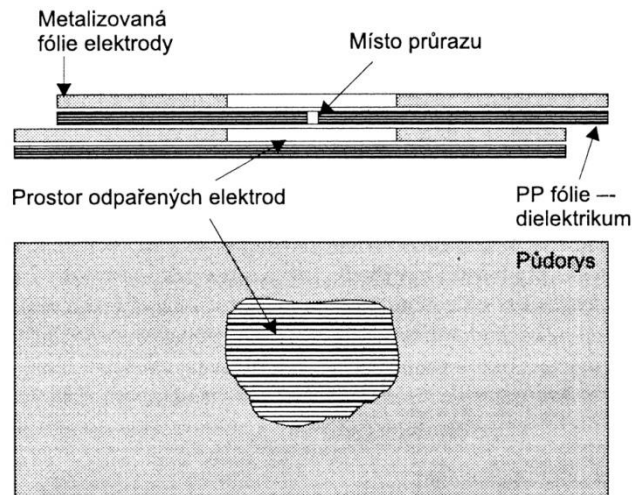
Obr. 18 Číslicový regulátor jalového výkonu, KMB Systems NOVAR 1114 [18]

## 2.3.2 Kondenzátory

Kompenzační kondenzátory patří k nedůležitějším součástem systémů pro kompenzaci jalového výkonu. V poslední době zaznamenala technologie výroby značný pokrok, který přinesl snížení měrného objemu kondenzátorů na jednotku výkonu, snížení jednotkových ztrát, zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti provozu. Bezpečnost provozu kondenzátorů zajišťuje především jejich samohojitelnost a přetlaková pojistka. [2]

### 2.3.2.1 Samohojitelnost

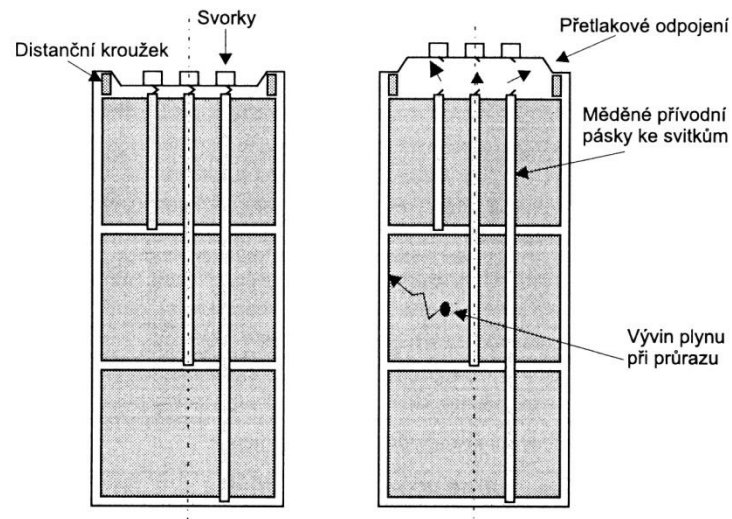
Při průrazu dielektrika např. krátkodobým napěťovým přetížením dojde v několika mikrosekundách k odpaření elektrod v oblasti průrazu a obnovení jeho izolační pevnosti. Úbytek kapacity je řádově 100 pF, což je pro celkovou kapacitu svitku zcela zanedbatelná hodnota. [2]



Obr. 19 Princip samohojitelnosti kondenzátoru [2]

### 2.3.2.2 Přetlaková pojistka

Má za úkol zabránit nebezpečné explozi kondenzátoru. Na konci životnosti kondenzátoru, při jeho tepelném zatížení nebo opakovaných průrazech dielektrika způsobených dlouhodobějším přepětím se kondenzátor samočinně odpojí od napájení pomocí přetlakové pojistky. [2]



Obr. 20 Přetlaková pojistka [2]

Odpařování elektrod je doprovázeno vývinem plynu a tím i nárůstem tlaku v nádobě. Pokud vnitřní přetlak překročí povolenou hodnotu, dojde k deformaci víčka nádoby kondenzátoru

a tím i k přetržení přívodu ke sítce. Tím je docíleno bezpečného odpojení kondenzátoru od napájecího napětí a zároveň je vyloučena další mechanická destrukce. [2]

Výrobci kondenzátorů musí na základě mezinárodních a evropských norem garantovat dovolená přepětí oproti jmenovitému napětí kondenzátoru:

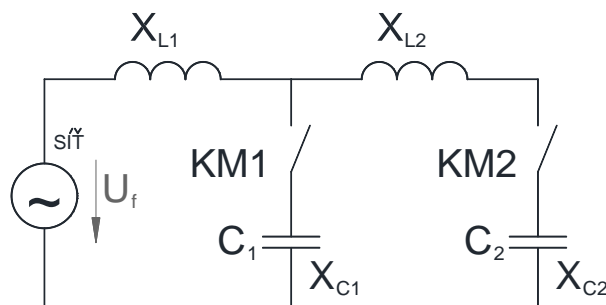
- $U_{CN} + 10\%$  po dobu 8 hodin denně,
- $U_{CN} + 15\%$  po dobu 30 minut denně,
- $U_{CN} + 20\%$  po dobu 5 minut,
- $U_{CN} + 30\%$  po dobu 1 minuty.

Dále je garantován bezporuchový provoz při proudovém přetížení  $1,3 \times I_{CN}$ . [2]

### 2.3.3 Spínací prvky

#### 2.3.3.1 Kontaktní spínací prvky

Mezi nejběžnější a nejpoužívanější spínací prvky patří stykače. Avšak při spínání vybitého kondenzátoru k síti dochází k nepříznivému přechodovému jevu. Připínání takového kondenzátoru je doprovázeno proudovým přechodovým jevem vyznačujícím se tlumeným kmitavým průběhem, jehož amplituda a kmitočet jsou dány velikostí napětí sítě, kapacitou kondenzátoru, okamžikem sepnutí a impedancí obvodu mezi připínaným kondenzátorem a zdrojem napětí. Zatímco přechodový děj při připínání prvního kondenzátoru je omezen relativně vysokou impedancí sítě, je připnutí dalšího nenabitého kondenzátoru doprovázeno přechodovým jevem, který je omezený pouze minimální impedancí silových přívodů k těmto kondenzátorům. Bohužel právě na tomto principu je postavený spínací mechanismus stupňovitě řízených kompenzací. Amplituda přechodového děje značně přesahuje i stonásobek jmenovitého proudu kondenzátoru a jeho kmitočet je nad hodnotou 10 kHz.



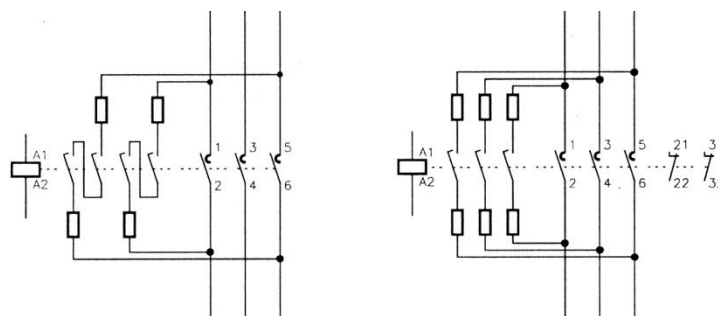
Obr. 21 Principiální schéma připínání nenabitých kondenzátorů při zanedbání činného odporu [2]

Tento děj negativně ovlivňuje životnost kontaktů stykačů, protože každé sepnutí má za následek jejich opalování, popř. svaření. Dalším negativním dopadem těchto

přechodových jevů je impulzní rušení, které díky vysokým kmitočetům mohou ohrozit funkci citlivých přístrojů. Omezení amplitudy a kmitočtu přechodového jevu při spínání kapacit lze provést zvýšením impedance elektrického obvodu mezi připínaným a již připnutým kondenzátorem. Tuto impedanci lze zvýšit buďto trvale, po celou dobu připnutí kondenzátoru, nebo pouze přechodně, jen na dobu sepnutí.

Pro trvalé zvýšení impedance se používají tlumivky se vzduchovým, popř. se železným jádrem. V případě tlumivek se vzduchovým jádrem se jedná o tlumivky s nízkou indukčností, ale jejich efekt nebývá dostatečný. Lze s nimi dosáhnout omezení amplitudy na hodnotu kolem 30 %. U tlumivek s železným jádrem je výsledný efekt výrazně lepší než u tlumivek se vzduchovým jádrem. Nevýhodou jsou rozměry, hmotnost a cena těchto tlumivek. Předřazení těchto tlumivek má své opodstatnění v případě chráněných kompenzací jako ochrana kondenzátorů před harmonickými proudy nebo jako součást kompenzačních filtrů. Použití těchto tlumivek jen z důvodu omezení spínacích přechodových jevů by bylo neekonomické.

Pro přechodné zvýšení impedance elektrického obvodu po dobu spínání se používá takzvané odporové spínání. Jeho princip je založený na zařazení odporu na velmi krátkou dobu, jeho následné odpojení a připojení kondenzátoru na plné napájecí napětí. Jedná se o dva přechodové děje, kdy první přechodový děj má aperiodický nekmitavý průběh a u následujícího přechodového děje je maximálně potlačena jeho počáteční amplituda.



Obr. 22 Odporové spínání [2]

Pro spínání kompenzačních sekcí u kompenzací na hladině vn se používají vakuové stykače nebo výkonové vypínače. Je nutné ověřit spínací schopnost kapacitních proudů těchto prvků a navrhnout opatření pro omezení přepětí vznikajících při vypínání. Mohou to být např. RC členy, svodiče přepětí apod. U vakuových stykačů se pro případ spínání kapacit používají speciální zhášedla se zvětšeným zdvihem, která zabrání vzniku samozápalů. Oproti kompenzačním zařízením nn bývá u zařízení vysokého napětí menší počet spínaných stupňů a i četnost spínání je menší. U kompenzací vn se odporové spínání nepoužívá. [2]

### 2.3.3.2 Bezkontaktní spínací prvky

Jedná se o náhradu stykače bezkontaktním spínačem, který je tvořen dvojicí antiparalelně zapojených tyristorů. Používá se zejména v případě rychlé chráněné kompenzace. Spínání tyristorů je ovládáno pomocí mikroprocesoru, každý tyristor spíná v jedné půlplně síťového napětí. Sepnutí tam může nastat v přesně definovaný okamžik, tím se velmi omezí přechodový jev.

V případě, že bychom připnuli vybitý kondenzátor v maximu síťového napětí, došlo by k velkému proudovému rázu. Připnutí kondenzátoru pomocí polovodičového spínače v tento okamžik je nepřipustný, jednak kvůli velkému nárůstu  $di/dt$  a také z důvodu maximálního opakovatelného proudu součástek. Takový proudový ráz by znamenal zničení polovodičových součástek; řídicí obvody tedy musí zamezit připnutí v tento okamžik. Přechodový jev nenastane, pokud připínáme kondenzátor, který je nabit na velikost napětí sítě. V případě předřazené tlumivky je kondenzátor nabit na napětí zvýšené o napětí na tlumivce.

Další způsob, který se používá v praktických aplikacích, je spínání nenabitého kondenzátoru v okamžiku průchodu napájecího napětí nulou. V tomto případě je přechodový jev velmi mírný, maximální hodnota proudu dosahuje nízkých hodnot a vliv na napájecí síť v místě napojení kondenzátoru je zanedbatelný.

U bezkontaktních spínačů je výhodou skutečnost, že oproti zařízení se stykači nejsou v kompenzačním rozvaděči instalované žádné mechanické součásti, což vede k vyšší rychlosti spínání. Nevýhodou takového řešení je bezesporu vyšší pořizovací cena a nutnost zajištění odvodu ztrátového tepla vznikajícího na polovodičových spínačích. [2]

### 2.3.4 Tlumivky

Využívají se převážně ve filtračně-kompenzačních zařízeních, dělíme je zpravidla na tlumivky ochranné, filtrační a dekompenzační.

#### 2.3.4.1 Ochranné tlumivky

Tyto tlumivky se využívají v chráněných kompenzačních sekcích se stykačovými nebo bezkontaktními spínači. Výrazně omezují spínací proudový ráz (prodloužení životnosti použitých prvků), zabraňují nebezpečným a nepříznivým rezoncancím v napájecí síti a výrazně zvyšují elektromagnetickou kompatibilitu sítě. V kompenzačním rozvaděči jsou největším zdrojem ztrátového tepla. [2]



#### **2.3.4.2 Filtrační tlumivky**

Sériová kombinace kondenzátoru a filtrační tlumivky má za úkol odstranění nežádoucích harmonických z napájecí sítě. Nevyrábí ve standardizovaných řadách, proto je nutný jejich individuální návrh a výroba. Proto jsou na pohled předimenzované a mají vyšší pořizovací hodnotu. [2]

#### **2.3.4.3 Dekompenzační tlumivky**

Používají se v místech s nadbytkem kapacitního výkonu, například u dlouhých napájecích kabelových tras v rozsáhlých průmyslových sítích a všude tam, kde je potřeba provádět opak kompenzace – tzv. dekompenzaci. Uplatňují se také v rychlých a dynamických kompenzacích účinníku. Návrh takové tlumivky je odlišný od ochranné a filtrační, protože dekompenzační tlumivka je navrhována pro jmenovité napětí s reaktancí, jejíž reaktivní výkon odpovídá právě potřebnému dekompenzačnímu výkonu. [2]

## 3 Návrh řešení kompenzace účinníku

Tato kapitola se zabývá návrhem postupu řešení kompenzace účinníku v části vodního hospodářství v papírnách Mondi Štětí a.s.

Papírna ve Štětí byla založena v roce 1949, kdy pro její stavbu bylo rozhodnuto o použití pozemků místního cukrovaru. Závod patří v současnosti mezi největší zaměstnavatele v regionu a vyprodukuje více než 1100 tun papíru denně. Vodu pro výrobu čerpá přímo z Labe a po vyčištění ve vlastní čističce odpadních vod ji do řeky opět vrací. Čistírna neslouží pouze závodu, ale také pro účely města Štětí. Účinnost biologického čištění vody v ní dosahuje téměř 99 %. [23]

### 3.1 Technologie vodního hospodářství

#### 3.1.1 Zásobování vodou

Surová voda je jímána břehovým jímácím objektem V101, umístěným na břehu Labe. Kapacita jímacího objektu je 15 000 m<sup>3</sup>/hod. Voda protéká hrubými česlemi umístěnými v jímácím objektu a teče dále potrubím do vtokové části čerpací stanice surové vody objektu V102. Voda proteče strojně stíranými česlemi, umístěnými v čerpací stanici surové vody. Odtud je čerpána čerpadly výtlačným potrubím do rozdělovací nádrže (objekt V103).

V rozdělovací nádrži se rozdělí celkové přitékající množství přes přepady rovnoměrně na tři klariflokulátory, ze kterých voda protéká radiálně k obvodovému přelivnému žlabu. V klariflokulátorech dojde k usazení všech hrubých suspendovaných látek. Regulaci zatížení klariflokulátorů je možné provést přivřením nebo otevřením kanálových šoupat v rozdělovací nádrži a tím zvýšit nebo snížit přítok. Jelikož není v rozdělovací nádrži uvažován přeliv při zvýšení hladiny, jsou čerpadla při zvýšené hladině blokována.

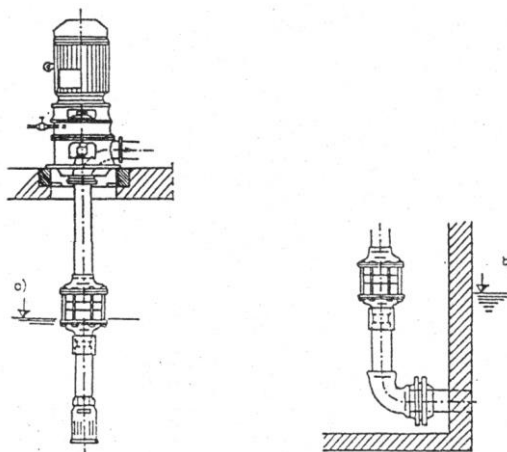
Krytými žlaby teče voda z klariflokulátorů do budovy mikrosít. Zde se voda filtruje a zbavuje mechanických nečistot.

Z objektu mikrosít je vyčištěná voda vedena do zásobníku vody. Na zásobník se napojuje čerpací stanice upravené vody (objekt V107 a R214). Čerpací stanice jsou navrženy se suchou jímkou pro vertikální čerpadla, která čerpají vodu do závodu. [23]

Důležitý soubor zařízení v systému zásobování vodou tvoří čerpací stanice, protože slouží k odběru vody z nádrží do technologie. Jejich úkolem je zabezpečit potřebné množství vody i potřebný tlak před jednotlivými spotřebiči.

Technologickou část čerpacích stanic tvoří strojovna s čerpacími agregáty, potrubím, ovládacími armaturami a elektrotechnické zařízení. Stavební část tvoří zpravidla jímka

(akumulační prostor) na straně sání čerpadel a budovy strojovny s jeřábovou dráhou. [7]



Obr. 23 Vertikální čerpadlo a) v mokré jímce, b) v suché jímce [7]

V současnosti jsou pro čerpání upravené vody do závodu používána čerpadla poháněná vysokonapěťovými motory a pro regulaci tlaku vody v potrubí slouží čerpadlo označené M1101, které je poháněné frekvenčně řízeným pohonem. Čerpadla, která jsou poháněna vysokonapěťovými motory, jsou vzájemně zálohována pro případ závady na některém z čerpadel. Provoz čerpadel je v pravidelných intervalech prostřídáván, aby byla zajištěna provozuschopnost zálohy, popř. byly včas zjištěny případné závady.

### 3.1.2 Biologická čistírna odpadních vod

Do čistírny přitékají odpadní vody jednotlivými stokami. Tyto odpadní vody ze stoky "B + G" a "C" protékají přes samočisticí česle do jímek vrtulové čerpací stanice, odkud jsou čerpány do přerušovacího žlabu. Ze žlabu natékají samospádem do usazovacích nádrží.

Stokou "V" přitékají odpadní vody do rozdělovacího objektu před usazovací nádrže č. 1 a č. 2, případně přímo do vyrovnávací nádrže.

Odpadní vody z proudu "M" a brýdové kondenzáty jsou zaústěny přímo do přerušovacího žlabu na vrtulové čerpací stanici, kde se míchají s proudy „B+G“ a „C“.

Odtud vody odtékají do usazovacích nádrží, kde dojde k usazení primárních kalů. Odtud odtékají odpadní vody do rozdělovacího žlabu vyrovnávací nádrže. Primární kaly jsou čerpány buď na kalové hospodářství k odvodnění, anebo na kalové pole.

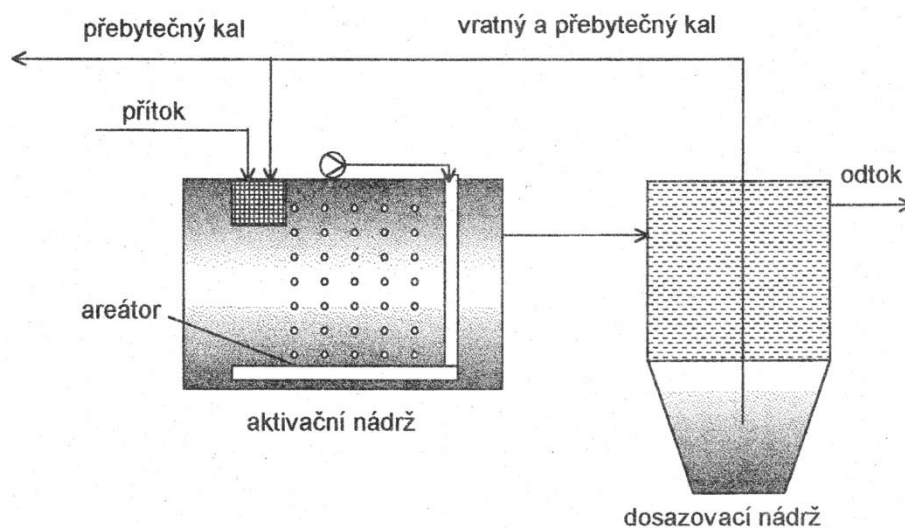
Ve vyrovnávací nádrži dojde k homogenizaci vod a k odvětrání, případně k oxidaci toxických látek.

Před vstupem do aktivačních nádrží jsou do odpadní vody přidávány živiny ve formě močoviny a kyseliny fosforečné. Směs odpadní vody a živin přitéká do jednotlivých aktivačních nádrží, kde po promísení s biologickým kalem probíhá vlastní biologické čištění

odpadních vod.

V případě zhoršených odtokových parametrů vyčištěné odpadní vody se na odtok z aktivačních nádrží dávkuje čířící chemikálie.

Směs vyčištěné vody a biokalu odtéká do dosazovacích nádrží, odkud po sedimentaci kalu odtéká vyčištěná voda do Labe. Biokal se vrací zpět do kalového žlabu před aktivační nádrže. Přebytečný biologický kal je čerpán buď na odvodňovací linky kalového hospodářství, popř. na kalové pole. [23]



Obr. 24 Principiální schéma aktivace [7]

Provoz jak celého závodu, tak i provoz vodního hospodářství je během celého roku nepřetržitý.

## 3.2 Lokální distribuční soustava

### 3.2.1 Rozvodny V118 a R214

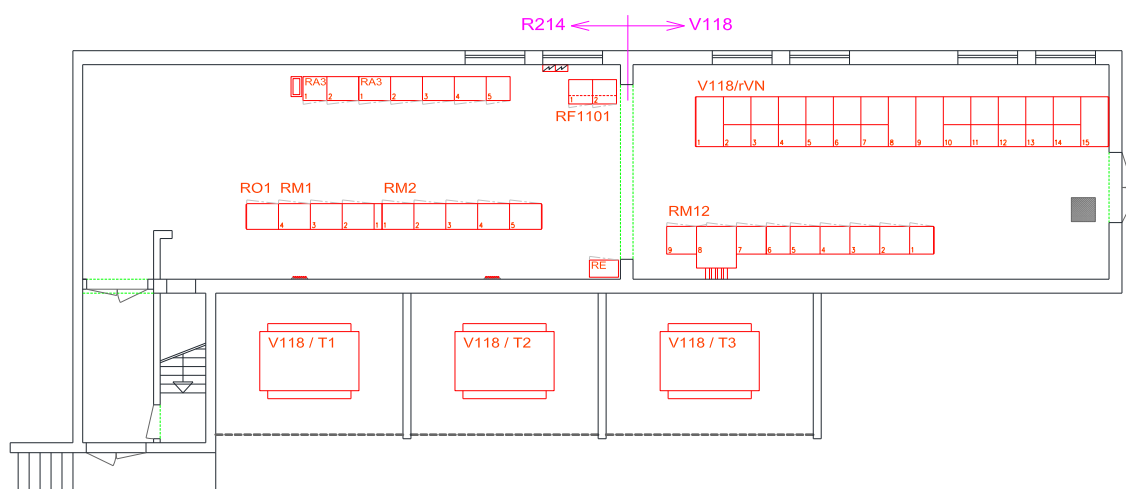
Rozvodny V118 a R214 zabezpečují distribuci elektrické energie vysokého a nízkého napětí v oblasti čerpání upravené vody do závodu. Nachází se zde vysokonapěťový rozvaděč V118/rVN, nízkonapěťové distribuční rozvaděče V118/RM12, R214/RM1, R214/RM2 a samostatně stojící skříň regulovaného pohonu RF1101 pro napájení asynchronního motoru čerpadla M1101.

**V118/rVN** - vysokonapěťový, vzduchem izolovaný rozvaděč Irodel typu VH151 o 15 polích, který je umístěný na vyrovnané betonové podlaze. Rozvaděč byl instalován v roce 1970. Napájení rozvaděče je provedeno 2 přívody z hlavní distribuční rozvodny R210 (umístěné ve skříních č. 1 a 15). Každý z přívodů je realizován 3 paralelními kabely typu 6–AYKCY 3x240/25. Skříně č. 4, 5, 10, 11 a 12 napájí motory čerpadel, skříně č. 2, 3 a 13

napájí transformátory T1, T2 a T3, ve skříních č. 8 a 9 je umístěná podélná spojka přípojníc. Skříně č. 6 a 7 jsou v současné době nevyzbrojená rezerva.

Dle plánu bude v příštích letech provedena výměna stávajícího rozvaděče za nový rozvaděč typu Siemens NXAIR, popř. ABB UniGear ZS1.

**V118/RM12** – je skříňový oceloplechový jednostranný rozvaděč o 9 polích umístěný na ocelovém rámu. Jmenovitý proud rozvaděče je 1600 A. Napájení rozvaděče zajišťuje transformátor T3 o výkonu 1000 kVA, vývod ze sekundární strany je proveden Al pasovinou 2x 80x10 mm a jištění rozvaděče je realizováno jističem Škoda EJF VMTN 2002-33/1500.



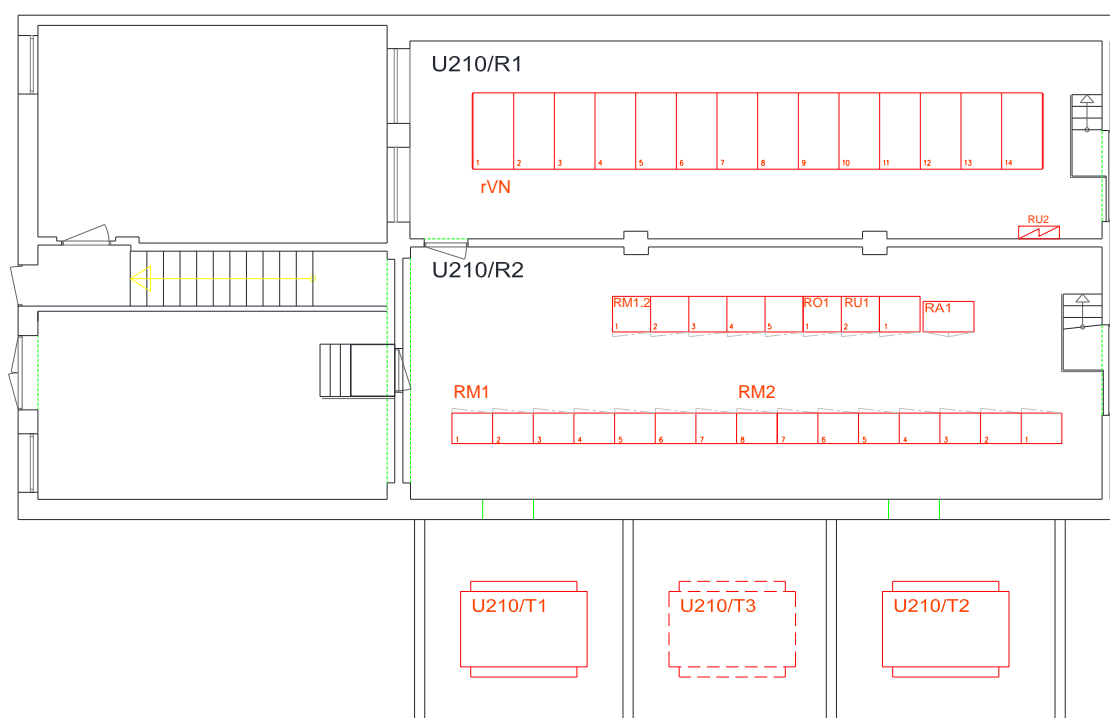
Obr. 25 Půdorysná dispozice rozveden V118 a R214

**R214/RM1** – je skříňový oceloplechový jednostranný rozvaděč o 4 polích umístěný na vyrovnané betonové podlaze. Jmenovitý proud rozvaděče je 1600 A. Napájení rozvaděče zajišťuje transformátor T1 o výkonu 1000 kVA, vývod ze sekundární strany do rozvaděče je proveden kabely 3x (2x 1–YY500) + 2x 1–YY300 a jištění rozvaděče je realizováno jističem OEZ BL 1600A. V poli č. 1 je instalována spojka sběren z/do R214/RM2 a propojení rozvaděčů je realizováno jističem OEZ BL 1600A.

**R214/RM2** – je skříňový oceloplechový jednostranný rozvaděč o 5 polích umístěný na vyrovnané betonové podlaze. Jmenovitý proud rozvaděče je 1600 A. Napájení rozvaděče zajišťuje transformátor T2 o výkonu 1000 kVA, napájení z transformátoru do rozvaděče je provedeno kabely 3x (2x 1–YY500) + 2x 1–YY300 a jištění rozvaděče je realizováno jističem OEZ BL 1600A. V době instalace rozvaděče v roce 2001 se jednalo o rozvaděč o 4 polích. V roce 2017 byl rozvaděč rozšířen o jednu skříň a tím se celkový počet polí zvýšil na pět.

### 3.2.2 Rozvodny U210

Tyto rozvodny slouží jako distribuční rozvodny vn a nn pro oblast biologické čistírny odpadních vod. Nachází se zde vysokonapěťový rozvaděč U210/rVN, nízkonapěťové distribuční rozvaděče U210/RM1, U210/RM2, podružné rozvaděče RM1.2, rozvaděč osvětlení RO1, rozvaděč nouzového osvětlení RU1 a rozvaděč řídicího systému RA1. Rozvodna proběhla v roce 2013 rekonstrukcí, kdy byly nahrazeny původní rozvaděče RM1 a RM2, byl instalován rozvaděč RA1 a zároveň došlo k celkovému zvednutí podlahy rozvodny o 0,8 m.



Obr. 26 Půdorysná dispozice rozvodny U210

**U210/rVN** – vysokonapěťový, vzduchem izolovaný rozvaděč Siemens typu NXAIR o 14 polích, který je z důvodu možného nebezpečí vniku vody při záplavách umístěn na vyvýšeném ocelovém rámu (instalace rozvaděče proběhla v roce 2013). Napájení rozvaděče je provedeno 2 přívody z hlavní distribuční rozvodny R210 (umístěné ve skříních č. 1 a 14). Každý z přívodů je realizován 4 paralelními kabely typu 6–AYKCY 3x240/25. Skříně č. 4, 10 a 11 napájí motory turbodmychadel, skříně č. 5 a 9 napájí transformátory T1 a T2, ve skříních č. 2 a 13 je měření, ve skříních č. 7 a 8 je umístěná podélná spojka přípojnic. Skříně č. 3, 6 a 12 jsou v současné době nevyzbrojená rezerva.

V minulosti byly z této rozvodny napájeny tři synchronní motory 1EB115–48–4Z (výrobce ČKD) o výkonu 1050 kW a dva synchronní motory 1EB136-55-4 (výrobce ČKD) o výkonu 2000 kW pohánějící dmychadla. Každý z těchto strojů současně mohl sloužit ke

kompenzaci účinníku ve sledovaném uzlu napájecí sítě. V rámci modernizace a optimalizace technologie bylo těchto pět synchronních strojů nahrazeno třemi novými asynchronními pohony o výkonu 750 kW. V budoucnu se uvažuje s instalací čtvrtého dmyhadla stejné konstrukce a o stejném výkonu a je tedy třeba počítat s nárůstem potřebného jalového výkonu.

**U210/RM1** – je skříňový oceloplechový jednostranný rozvaděč o 8 polích umístěný na vyvýšeném ocelovém rámu. Jmenovitý proud rozvaděče je 1600 A. Napájení rozvaděče zajišťuje transformátor T1 o výkonu 1000 kVA, vývod ze sekundární strany do rozvaděče je proveden kabely 3x (2x 1–YY500) + 1–YY500 a jištění rozvaděče je realizováno jističem OEZ Arion WL1116 1600A. V poli č. 8 je instalována spojka sběren z/do U210/RM2 a propojení rozvaděčů je realizováno jističem OEZ Arion WL1116 1600A. V přívodním poli je instalován kondenzátor o výkonu 12,5 kvar pro kompenzaci jalového proudu transformátoru při chodu naprázdno.

**U210/RM2** – je skříňový oceloplechový jednostranný rozvaděč o 7 polích umístěný na vyvýšeném ocelovém rámu. Rozvaděč RM2 stojí v jedné řadě s rozvaděčem RM1, na který přímo navazuje a je s ním přímo spojený přes spojku sběren. Jmenovitý proud rozvaděče je 1600 A. Napájení rozvaděče zajišťuje transformátor T2 o výkonu 1000 kVA, vývod ze sekundární strany do rozvaděče je proveden kabely 3x (2x 1–YY500) + 1–YY500 a jištění rozvaděče je realizováno jističem OEZ Arion WL1116 1600A. V přívodním poli je instalován kondenzátor o výkonu 12,5 kvar pro kompenzaci jalového proudu transformátoru při chodu naprázdno.

Před rekonstrukcí rozvoden byly v rozvodně U210/R2 instalovány tři kompenzační rozvaděče o výkonu 360 kvar, které byly z důvodu jejich provozní nespolehlivosti a morální zastaralosti trvale odstaveny a demontovány. V současných rozvaděčích RM1 a RM2 je počítáno s rezervou pro připojení nových kompenzačních rozvaděčů RC1 a RC2.

### 3.3 Výpočet a dimenzování kompenzačních prvků

Nejčastější zátěž je tvořena asynchronními motory a jejich zatížení je během celého roku téměř konstantní. Proto není nutná vysoká dynamika spínání navrhovaných kompenzačních rozvaděčů a budou tedy navrženy jako stupňovitě spínané.

Kompenzační zařízení bude navrženo z důvodu vyššího obsahu harmonických ve sledované síti jako chráněná kompenzace. Tyto harmonické jsou generovány stávajícími frekvenčními měniči a vzhledem ke zvyšující se optimalizaci technologie lze předpokládat jejich nárůst. Instalace chráněné kompenzace byla požadována energetikem závodu, který

současně požaduje návrh kompenzačních rozvaděčů na účinník 0,98 a výkonovou rezervu kolem 20 %. Touto navrženou rezervou budou pokryté i případné výkonové špičky.

Při návrhu chráněné kompenzace je jedním z důležitých parametrů činitel ztlumení  $p$ , kdy pro jeho určení je nutné brát ohled na signál HDO. Rezonanční kmitočet musí být zvolen od kmitočtu HDO s dostatečným odstupem, aby nedocházelo k jeho odsávání ze sítě. V praxi se nejčastěji používá  $f_r=189$  Hz a tomu odpovídající činitel ztlumení  $p = 7$  %. Pro signál HDO je v napájecí síti papíren použit kmitočet 216,66 Hz.

Výpočty, ze kterých jsou jednotlivé kompenzační rozvaděče navrhovány, vychází z naměřených hodnot elektroměrů (na straně vn) a projektové dokumentace. U rozvaděčů nízkého napětí bylo provedeno ověřovací měření analyzátory sítě.



Obr. 27 Připojený analyzátor sítě  
NEMO 101 [23]



Obr. 28 Připojený analyzátor sítě  
ENA 330 [23]

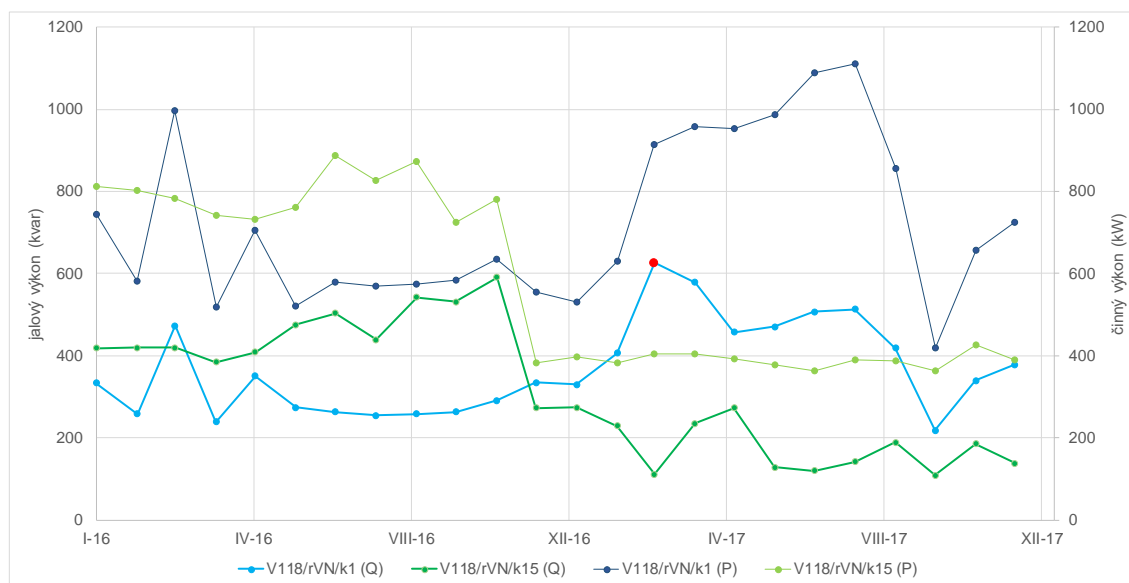
### 3.3.1 Měřené hodnoty

Z přívodních polí vn rozvaděčů jsou přenášeny do informačního (bilančního) systému čtvrt hodinové průměrné hodnoty které jsou dále integrovány:

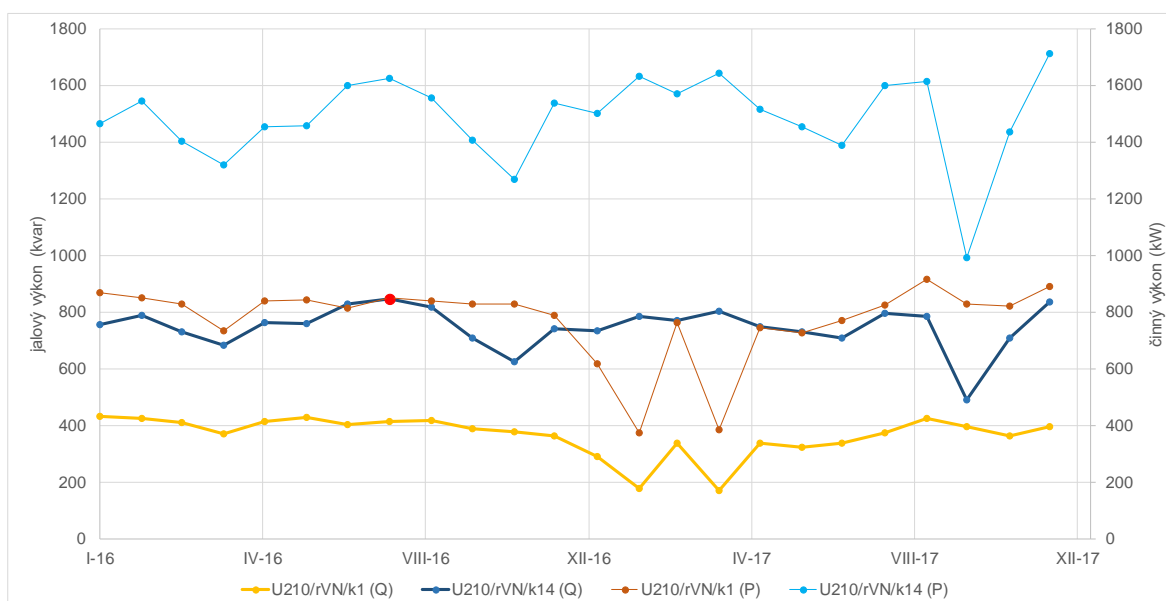
$A_{\bar{c}}$	odebraná činná energie	(Wh)
$A_j$	odebraná jalová energie	(varh)
$P_{max}$	čtvrt hodinové maximum činného výkonu	(kW)



Bilanční systém poskytuje dostatek historických dat, která jsou vhodná pro sledování provozních stavů (zátížení) a zvolení optimálních podmínek návrhu (viz grafy níže).



Obr. 29 Odečtené hodnoty z elektroměrů rozvaděče V118/rVN  
(červený bod – hodnota zvolená pro návrh)

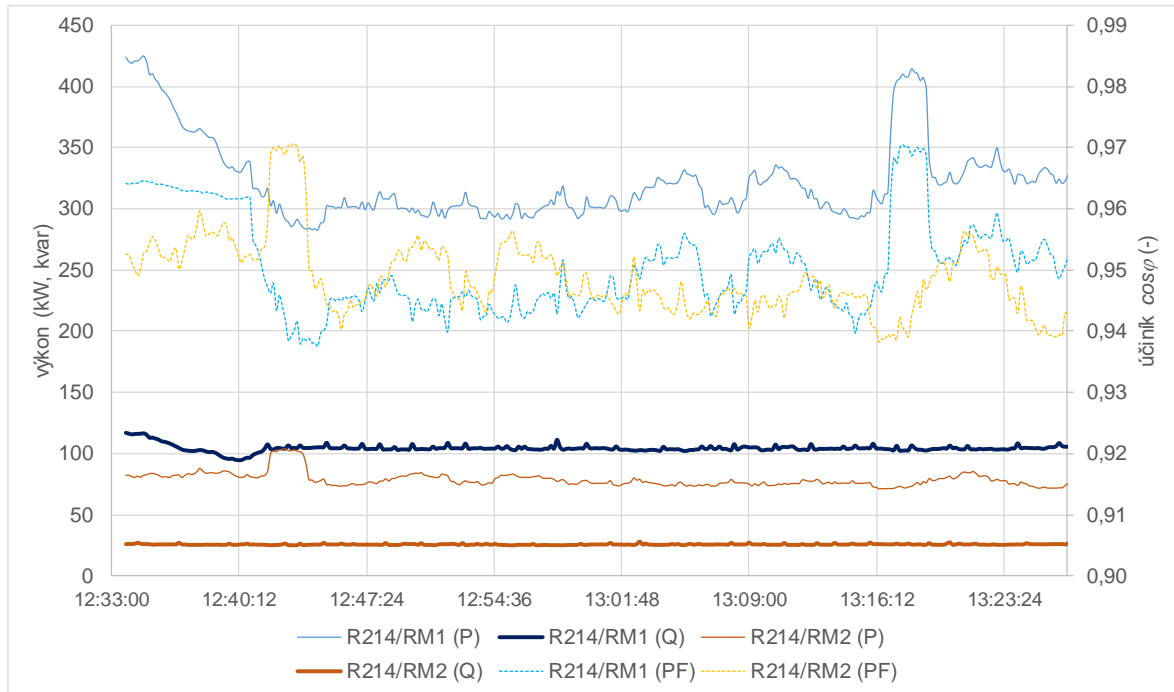


Obr. 30 Odečtené hodnoty z elektroměrů rozvaděče U210/rVN  
(červený bod – hodnota zvolená pro návrh)

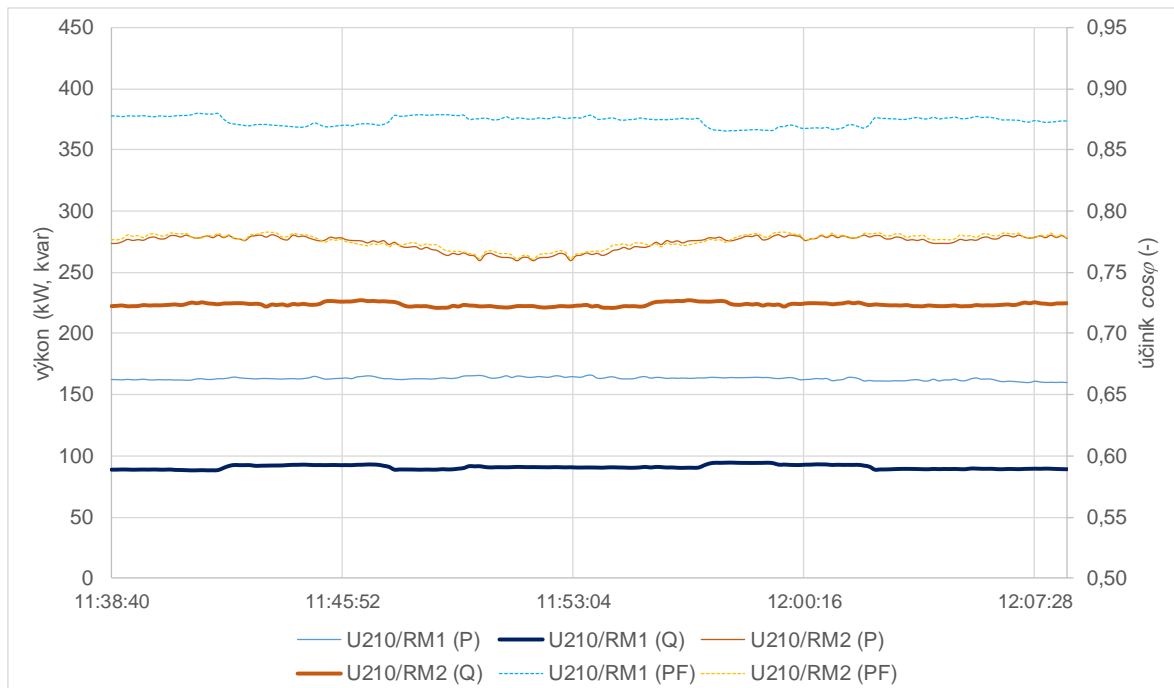
Z analyzátorů sítě jsem pro rozvaděče nízkého napětí získal tato krátkodobá data, okamžité hodnoty:

$U_{ij}$	sdužených napětí	(V)
$U_i$	fázových napětí	(V)
$I_i$	fázových proudů	(A)
$P_i$	činného výkonu jednotlivých fází	(kW)
$Q_i$	jalového výkonu jednotlivých fází	(kvar)

$S_i$	sduženého výkonu jednotlivých fází	(kVA)
$PF_i$	skutečného účinníku jednotlivých fází	(-)
$THD_U$	celkové harmonické zkreslení napětí jednotlivých fází	(%)
$THD_I$	celkové harmonické zkreslení proudu jednotlivých fází	(%)



Obr. 31 Odečtené hodnoty z analyzátoru rozvaděče R214/RM1 a R214/RM2



Obr. 32 Odečtené hodnoty z analyzátoru rozvaděče U210/RM1 a U210/RM2

S ohledem na vysokou pořizovací cenu vysokonapětového kompenzačního rozvaděče, není ekonomické kompenzovat nízké jalové výkony. Cena každého z kompenzačních stupňů se pohybuje řádově ve stovkách tisíc korun, proto je vhodné omezit celkový počet kompenzačních stupňů na přípustný minimální počet. Jednotlivé stupně je ale nutné volit takovým způsobem, aby byla potřeba jalové energie pokryta v co možná nejplynulejším rozsahu. Proto budou jednotlivé stupně navrhovány v násobcích základního kompenzačního stupně.

### 3.3.2 Návrh kompenzace rozvodny V118

Pro návrh kompenzace uvažují pracovní bod s nejvyšší potřebou jalového výkonu, jak je patrné z výše uvedeného grafu (obr. 29).

Tab. 4. Naměřené a vypočítané hodnoty rozvaděče V118/rVN – přívodní kobka č. 1 [23]

rok	měsíc	$A_{\Sigma}$ (kWh)	$A_j$ (kvarh)	$\cos\varphi$ (-)	$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\text{kom}}$ (kvar)	$Q_{\text{kom}+20\%}$ (kvar)
2016	leden	553.956	247.968	0,913	941,0	182,10	218,52
	únor	403.941	179.951	0,913	974,9	140,70	168,84
	březen	740.525	352.204	0,903	1100,6	271,28	325,54
	duben	373.084	171.949	0,908	1100,7	133,60	160,32
	květen	525.541	260.765	0,896	968,5	207,06	248,47
	červen	374.652	196.930	0,885	1100,7	167,85	201,42
	červenec	431.505	195.630	0,911	1100,7	145,17	174,21
	srpen	424.152	188.952	0,913	956,0	138,20	165,85
	září	412.668	185.892	0,912	926,0	141,80	170,16
	říjen	434.783	195.258	0,912	974,9	143,78	172,53
	listopad	456.230	209.182	0,909	974,9	161,86	194,23
	prosinec	412.966	249.165	0,856	627,7	222,19	266,63
2017	leden	394.946	245.362	0,849	560,8	222,00	266,39
	únor	422.890	273.031	0,840	957,4	278,51	334,21
	březen	679.087	465.512	0,825	955,2	440,35	528,42
	duben	690.116	416.378	0,856	1016,7	383,67	460,41
	květen	709.641	340.099	0,902	1029,9	263,44	316,13
	červen	710.364	338.613	0,903	1100,6	269,95	323,95
	červenec	809.999	376.995	0,907	1165,6	285,64	342,77
	srpen	826.161	381.637	0,908	1186,1	287,47	344,96
	září	615.339	301.423	0,898	1080,1	245,10	294,12
	říjen	310.939	162.061	0,887	746,8	132,96	159,55
	listopad	472.214	244.542	0,888	778,9	206,47	247,76
	prosinec	539.781	281.681	0,887	782,2	231,28	277,54

Výpočet účinníku  $\cos\varphi$ :

$$\cos\varphi = \frac{A_{\xi}}{\sqrt{A_{\xi}^2 + A_j^2}} \quad (-) \quad (24)$$

$$\cos\varphi = \frac{679\,087}{\sqrt{679\,087^2 + 465\,512^2}} = 0,825$$

Z odebíraných činných a jalových výkonů lze určit jejich střední výkony:

$$P = \frac{A_{\xi}}{t} \quad (\text{W}) \quad (25)$$

$$P = \frac{A_{\xi}}{d \cdot h} = \frac{679\,087}{31 \cdot 24} = 912,75 \text{ kW}$$

$$Q = \frac{A_j}{t} \quad (\text{var}) \quad (26)$$

$$Q = \frac{A_j}{d \cdot h} = \frac{465\,512}{31 \cdot 24} = 625,69 \text{ kvar}$$

Výpočet zdánlivého výkonu po kompenzaci na  $\cos\varphi = 0,98$ :

$$S_k = \frac{P}{\cos\varphi_k} \quad (\text{VA}) \quad (27)$$

$$S_k = \frac{912,75}{0,98} = 931,38 \text{ kVA}$$

Výpočet jalového výkonu po kompenzaci:

$$Q_k = \sqrt{S_k^2 - P^2} \quad (\text{var}) \quad (28)$$

$$Q_k = \sqrt{931,38^2 - 912,75^2} = 185,34 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu:

$$Q_{kom} = Q - Q_k \quad (\text{var}) \quad (29)$$

$$Q_{kom} = 625,69 - 185,34 = 440,35 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu vč. rezervy výkonu 20 %:

$$Q_{kom+20\%} = 1,2 \cdot Q_{kom} \quad (\text{var}) \quad (30)$$

$$Q_{kom+20\%} = 1,2 \cdot 440,35 = 528,42 \text{ kvar}$$

Určení skutečného napětí na kondenzátoru:

$$U_C = \frac{U_s}{1 - p} \quad (\text{V}) \quad (31)$$

$$U_C = \frac{6300}{1 - 0,07} = 6774,2 \text{ V}$$

Z katalogu výrobce kondenzátorů [19] zjišťuji, že nejbližší vhodná napěťová hladina použitelných kondenzátorů je 7,2 kV. Určení napěťové hladiny kondenzátoru  $U_{CN}$  potřebuji pro výpočet skutečného kompenzačního výkonu.

Z odečtených hodnot na obr. 29 je vidět, že potřebný kompenzační výkon je u obou polovin přívodů rozvaděče téměř stejný, navrhuji oba kompenzační rozvaděče V118/RC1 a V118/RC2 o stejném instalovaném kompenzačním výkonu  $Q_i$ .

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 100 + 200 + 400 = 700 \text{ kvar}$$

Určení skutečného kompenzačního výkonu kompenzačního rozvaděče při respektování vlivu zatlumení  $p$  a  $U_{CN}$ :

$$Q_{kom/7\%} = \left( \frac{U_s}{U_{CN}} \right)^2 \cdot \frac{Q_{kom}}{1 - p} \quad (\text{var}) \quad (32)$$

$$Q_{kom/7\%} = \left(\frac{6300}{7200}\right)^2 \cdot \frac{700}{1 - 0,07} = 576,28 \text{ kvar}$$

Instalovaný kompenzační výkon pokrývá požadavky provozu a je zcela dostačující včetně požadované rezervy 20 %.

Tab. 5. Tabulka vypočtených hodnot pro kompenzační rozvaděč V118

Stupeň kompenzace, n (-)	$Q_n$ (kvar)	$Q_{n7\%}$ (kvar)	$X_C$ ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )	L (mH)
1	100	82,33	518,40	36,29	115,51
2	200	164,65	259,20	18,14	57,75
3	400	329,30	129,60	9,07	28,88
Celkem	700	576,28	-	-	-

Pro návrh kompenzačního rozvaděče je nutné stanovit reaktance a indukčnosti jednotlivých hradicích tlumivek. Následující výpočet je ilustrační pro největší kompenzační stupeň 400 kvar.

Výpočet reaktance kondenzátoru  $Q_C = 400$  kvar:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} \quad (\Omega) \quad (33)$$

$$X_{C(400)} = \frac{7,2^2}{0,25} = 129,6 \Omega$$

Výpočet reaktance hradicí tlumivky:

$$X_L = p \cdot X_C \quad (\Omega) \quad (34)$$

$$X_{L(400)} = 0,07 \cdot 129,6 = 9,07 \Omega$$

Výpočet indukčnosti hradicí tlumivky:

$$L_L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (\Omega) \quad (35)$$

$$L_{L(400)} = \frac{9,07}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 28,88 \text{ mH}$$

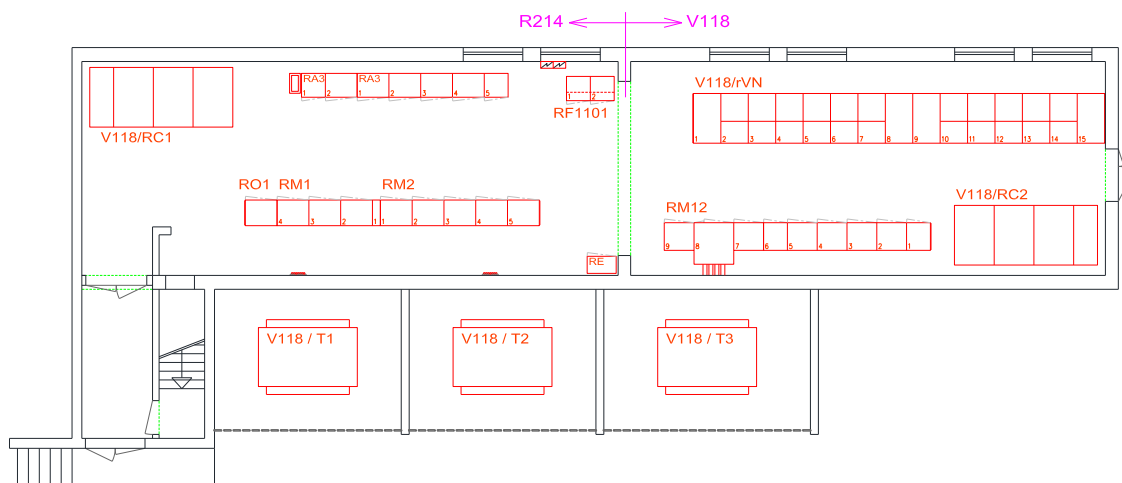
Na základě předchozích výpočtů navrhuji instalaci dvou kompenzačních rozvaděčů od výrobce ZEZ SILKO ACB 7,2–700 s kondenzátory CPEFS 23 - 7,2 a tlumivkami Mangoldt, každý o celkovém instalovaném výkonu 700 kvar. Kompenzační rozvaděč se skládá ze čtyř polí, jednoho přívodního a řídicího pole a třemi poli s jednotlivými kompenzačními stupni. Rozvaděč je navržený jako třístupňový s vahou spínání 1:2:4, tím bude dosaženo co možná nejlepší míry vykompenzování sledovaného uzlu sítě. Rozvaděč bude dále vybavený pomocnými (bezpečnostními) obvody, které zahrnují hlášení otevření dveří rozvaděče, signalizaci přehřátí rozvaděče a signalizaci působení pojistek a dalších příslušných poruch.

V současnosti má rozvaděč V118/rVN dvě skříně, které slouží jako rezerva. Bohužel jsou obě volné skříně ve stejné polovině rozvaděče (skříně č. 6 a 7). Druhá polovina rozvaděče nedisponuje žádnou rezervní skříní, proto bude nutné provést přepojení vývodu motoru M1102 ze stávající skříně č. 10 do skříně č. 6. Nově instalované kompenzační rozvaděče budou připojeny do skříně č. 7 (V118/RC1) a č. 10 (V118/RC2) kabelem 6–AYKCY 3x240/25.

Měřením analyzátorů sítě bylo zjištěno, že odběry jalových výkonů transformátorů T1, T2 a T3 jsou relativně nízké. Stávající půdorysná dispozice rozvodny V118 (R214) neumožňuje instalaci nízkonapěťových kompenzačních rozvaděčů, které by kompenzovaly tyto transformátory na straně nízkého napětí. Z těchto dvou hledisek vyplývá, že instalace nn kompenzace by v současnosti neměla vhodný ekonomický dopad a proto energetik závodu s její instalací neuvažuje.

### **Popis instalace rozvaděčů a nutných úprav v rozvodně V118 (R214)**

- Dozbrojení rezervních skříní č. 6 a 7 v rozvaděči V118/rVN.
- Přepojení vývodu motoru M1102 ze skříně č. 10 do skříně č. 6.
- Úprava skříně č. 10 v rozvaděči V118/rVN pro napojení rozvaděče RC2.
- Výroba a instalace nových ocelových rámců pro rozvaděče RC1 a RC2.
- Vybourání otvoru pro stěhování rozvaděčů.
- Instalace a sestavení rozvaděčů RC1 a RC2.
- Zazdění vybouraného otvoru.
- Instalace kabelových tras.
- Pokládka silových a ovládacích kabelů.
- Instalace vzduchotechniky a klimatizační jednotky.
- Instalace protipožárního systému měkkou protipožární ucpávkou.
- Zhotovení výchozí revize na nově instalovaná zařízení a přepojený vývod.



Obr. 33 Navrhovaná půdorysná dispozice rozvodu V118 (R214)

### 3.3.3 Návrh kompenzace rozvodny U210

Pro návrh kompenzace uvažují rovněž, stejně jako v předchozím případě, pracovní bod s nejvyšší potřebou jalového výkonu. Tento pracovní bod je patrný z výše uvedeného grafu (obr. 30). Obecné vztahy jednotlivých výpočtů jsou uvedené v předchozí kapitole.

Tab. 6. Naměřené a vypočítané hodnoty rozvaděče U210/rVN – přívodní kobka č. 14 [23]

rok	měsíc	$A_{\check{c}}$ (kWh)	$A_j$ (kvarh)	$\cos\varphi$ (-)	$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\text{kom}}$ (kvar)	$Q_{\text{kom}+20\%}$ (kvar)
2016	duben	951 480	490 656	0,889	1761,0	413,12	495,75
	květen	1 082 436	566 592	0,886	1811,0	466,12	559,35
	červen	1 050 024	546 708	0,887	1682,0	463,18	555,82
	červenec	1 190 844	617 040	0,888	1938,0	504,34	605,21
	srpen	1 209 240	630 876	0,887	1693,0	517,92	621,50
	září	1 120 380	587 652	0,886	1689,0	500,21	600,25
	říjen	1 046 927	526 629	0,893	1749,5	422,10	506,52
	listopad	914 832	449 964	0,897	1802,0	366,94	440,33
	prosinec	1 145 220	550 308	0,901	1817,0	427,10	512,52
2017	leden	1 116 324	544 836	0,899	1831,5	427,63	513,16
	únor	1 097 400	528 000	0,901	1827,0	454,11	544,93
	březen	1 168 125	574 354	0,897	1770,5	453,17	543,80
	duben	1 182 504	577 692	0,899	1734,5	468,85	562,62
	květen	1 128 984	556 152	0,897	1741,0	439,38	527,26
	červen	1 048 416	526 380	0,894	1703,0	435,40	522,48
	červenec	1 034 136	525 900	0,891	1689,0	424,61	509,53
	srpen	1 189 596	592 992	0,895	1678,5	472,36	566,83
	září	1 163 784	565 452	0,899	2596,5	457,13	548,56
	říjen	739 356	365 621	0,896	1690,5	289,64	347,56
	listopad	1 034 484	510 084	0,897	1760,5	416,70	500,04
	prosinec	1 273 608	621 624	0,899	1803,5	487,91	585,49



**3.3.3.1 Návrh vn kompenzace účinníku celé spotřeby rozvoden U210**

Výpočet účinníku  $\cos\varphi$  dle vztahu (24):

$$\cos\varphi = \frac{1\,209\,240}{\sqrt{1\,209\,240^2 + 630\,876^2}} = 0,887$$

Určení skutečných odebíraných činných a jalových výkonů dle vztahů (25) a (26):

$$P = \frac{1\,209\,240}{31 \cdot 24} = 1625,32 \text{ kW}$$

$$Q = \frac{630\,876}{31 \cdot 24} = 847,95 \text{ kvar}$$

Výpočet zdánlivého výkonu po kompenzaci na  $\cos\varphi = 0,98$  dle vztahu (27):

$$S_k = \frac{1625,32}{0,98} = 1658,49 \text{ kVA}$$

Výpočet jalového výkonu po kompenzaci dle vztahu (28):

$$Q_k = \sqrt{1658,49^2 - 1625,32^2} = 330,0 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu dle vztahu (29):

$$Q_{kom} = 847,95 - 330,0 = 517,95 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu vč. rezervy výkonu 20 % dle vztahu (30):

$$Q_{kom+20\%} = 1,2 \cdot 517,95 = 621,54 \text{ kvar}$$

Vzhledem ke skutečnosti, že z každé poloviny vysokonapěťového rozvaděče uvažují napájení stejné zátěže, tzn. dva asynchronní motory o stejném výkonu 750 kW a jeden transformátor o výkonu 1000 kVA, mohou navrhnout oba kompenzační rozvaděče U210/RC1 a U210/RC2 o stejném instalovaném kompenzačním výkonu  $Q_i$ .

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 115 + 230 + 460 = 805 \text{ kvar}$$

Určení skutečného výkonu kompenzačního rozvaděče dle vztahu (32):

$$Q_{C/7\%} = \left(\frac{6300}{7200}\right)^2 \cdot \frac{805}{1 - 0,07} = 662,72 \text{ kvar}$$

Instalovaný kompenzační výkon pokrývá požadavky provozu a je zcela dostačující včetně požadované rezervy 20 %.

Tab. 7. Tabulka vypočtených hodnot pro kompenzační rozvaděč U210 – varianta 1.

Stupeň kompenzace, n (-)	$Q_n$ (kvar)	$Q_{n7\%}$ (kvar)	$X_C$ ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )	L (mH)
1	115	94,67	450,78	31,55	100,44
2	230	189,35	225,39	15,78	50,22
3	460	378,70	112,70	7,89	25,11
Celkem	805	662,72	-	-	-

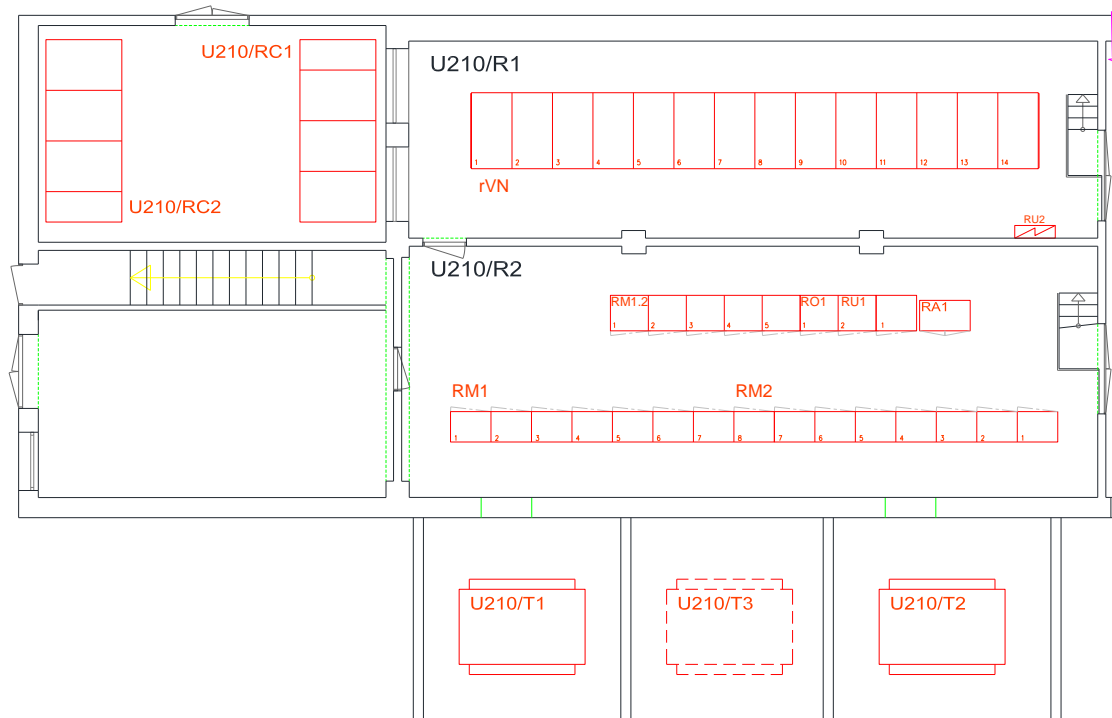
Na základě předchozích výpočtů navrhuji instalaci dvou kompenzačních rozvaděčů od výrobce ZEZ SILKO, typ ACB 7,2–805 s kondenzátory CPEFS 23 - 7,2 a tlumivkami Mangoldt, každý o celkovém instalovaném výkonu 805 kvar. Kompenzační rozvaděč se skládá ze čtyř polí, jednoho přívodního a řídicího pole a třemi poli s jednotlivými kompenzačními stupni. Rozvaděč je navržený jako třístupňový s vahou spínání 1:2:4, tím bude dosaženo co možná nejlepší míry vykompenzování sledovaného uzlu sítě. Rozvaděč bude dále vybavený pomocnými (bezpečnostními) obvody, které zahrnují hlášení otevření dveří rozvaděče, signalizaci přehřátí rozvaděče a signalizaci působení pojistek a dalších příslušných poruch.

V současnosti má rozvaděč U210/rVN tři skříně, které slouží jako rezerva. Nově instalované kompenzační rozvaděče budou připojeny do skříní č. 3 (U210/RC1) a č. 12 (U210/RC2) kabelem 6–AYKCY 3x240/25.

### Popis instalace rozvaděčů a nutných úprav v rozvodně U210

- Dozbrojení rezervních skříní č. 3 a 2 v rozvaděči U210/rVN.
- Výroba a instalace nových ocelových rámců pro rozvaděče RC1 a RC2.
- Instalace zvýšené zdvojené podlahy
- Vybourání otvoru pro stěhování rozvaděčů.
- Instalace a sestavení rozvaděčů RC1 a RC2.
- Zazdění vybouraného otvoru.
- Instalace kabelových tras.
- Pokládka silových kabelů a ovládacích kabelů.

- Instalace vzduchotechniky a klimatizační jednotky.
- Instalace protipožárního systému měkkou protipožární ucpávkou.
- Zhotovení výchozí revize na nově instalovaná zařízení.



Obr. 34 Navrhovaná půdorysná dispozice rozvodn U210 (Varianta 1)

### 3.3.3.2 Návrh vn kompenzace účinníku motorů dmychadel

Norma ČSN 33 3080 doporučuje, pokud je to technicky možné, individuální kompenzaci spotřebičů [8], toto není vzhledem k rozsáhlosti lokální sítě možné, proto navrhuji kompenzovat spotřebu transformátorů T1 a T2 na straně nízkého napětí. V tom případě by na straně vysokého napětí zůstala potřeba kompenzovat pouze jalové odběry motorů dmychadel. Výpočet potřeby jalového výkonu jednoho dmychadla jsem provedl na základě štítkové hodnoty motoru.

Výpočet celkového zdánlivého výkonu motoru dmychadla:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (\text{VA}) \quad (36)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 81 \cdot 0,92 = 813,16 \text{ kVA}$$

Výpočet jalového výkonu motoru dmyhadla:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{var}) \quad (37)$$

$$Q = \sqrt{813,16^2 - 750^2} = 314,21 \text{ kvar}$$

Vypočítaná hodnota odběru jalového výkonu je srovnatelná s odečtenou hodnotou na motorové ochraně instalované ve vývodové kobce motoru.

Výpočet zdánlivého výkonu motoru dmyhadla po kompenzaci na  $\cos\varphi = 0,98$  dle vztahu (27):

$$S_k = \frac{750}{0,98} = 765,31 \text{ kVA}$$

Výpočet jalového výkonu po kompenzaci dle vztahu (28):

$$Q_k = \sqrt{765,31^2 - 750^2} = 152,29 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu motoru dmyhadla dle vztahu (29):

$$Q_{kom} = 314,21 - 152,29 = 161,92 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu motoru dmyhadla vč. rezervy výkonu 20 % dle vztahu (30):

$$Q_{kom+20\%} = 1,2 \cdot 161,92 = 194,3 \text{ kvar}$$

Skutečný kompenzační výkon kondenzátoru 250 kvar dle vztahu (32):

$$Q_{kom/7\%} = \left(\frac{6300}{7200}\right)^2 \cdot \frac{250}{1 - 0,07} = 205,81 \text{ kvar}$$

Z výše uvedeného výpočtu vyplývá, že pro kompenzaci dmyhadla mohu počítat s instalací kondenzátoru o výkonu 250 kvar. Celkový kompenzační výkon  $Q_i$  jednoho kompenzačního rozvaděče potom bude:

$$Q_i = Q_1 + Q_2 = 250 + 250 = 500 \text{ kvar}$$

Tab. 8. Tabulka vypočtených hodnot pro kompenzační rozvaděč U210 – varianta 2.

Stupeň kompenzace, n (-)	$Q_n$ (kvar)	$Q_{n7\%}$ (kvar)	$X_C$ ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )	L (mH)
1	250	205,81	207,36	14,52	46,20
2	250	205,81	207,36	14,52	46,20
Celkem	500	411,62	-	-	-

V kompenzačním rozvaděči U210/RC1 uvažuji stoprocentní výkonovou rezervu, kdy počítám s rozšířením provozu a instalací čtvrtého dmyhadla.

Na základě předchozích výpočtů navrhuji instalaci dvou kompenzačních rozvaděčů od výrobce ZEZ SILKO, typ ACB 7,2–500 s kondenzátory CPEFS 23 - 7,2 a tlumivkami Mangoldt, každý o celkovém instalovaném výkonu 500 kvar. Kompenzační rozvaděč se skládá ze tří polí, jednoho přívodního a řídicího pole a dvěma poli s jednotlivými kompenzačními stupni. Rozvaděč je navržený jako dvoustupňový s váhou spínání 1:1. Rozvaděč bude vybavený pomocnými obvody, které zahrnují hlášení otevření dveří rozvaděče, signalizaci přehřátí rozvaděče a signalizaci působení pojistek a dalších příslušných poruch.

Čísla skříní pro napojení kompenzačních rozvaděčů a popis instalace nutných úprav je popsán v předchozí kapitole.

### 3.3.3.3 Návrh nn kompenzace účinníku rozvaděčů U210/RM1 a U210/RM2

Pro vykompenzování jalového výkonu nízkonapětových rozvaděčů uvažuji s instalací dvou kompenzačních rozvaděčů. Pro jejich návrh vycházím z dodaných středních hodnot výkonů a účinníku, které byly zaznamenány pomocí analyzátorů sítě (na přívodech rozvaděče).

Na základě provedeného měření jsem zjistil, že při aktuální dispozici (sepnutí jednotlivých vývodů) jsou odběry z rozvaděčů U210/RM1 a U210/RM2 nerovnoměrné. Z tohoto důvodu uvažuji pro dimenzování jednotlivých kompenzačních rozvaděčů celkový potřebný výkon tak, aby byly umožněny s dostatečnou rezervou kompenzace nejméně příznivé provozní stavy. Každá z podružných rozvodů disponuje dvěma přívody z těchto

distribučních rozvaděčů, jeden přívod je vždy z rozvaděče U210/RM1 a druhý přívod z U210/RM2.

Výpočet zdánlivého výkonu po kompenzaci na  $\cos\varphi = 0,98$  dle vztahu (27):

$$S_k = \frac{439,57}{0,98} = 448,54 \text{ kVA}$$

Výpočet jalového výkonu po kompenzaci dle vztahu (28):

$$Q_k = \sqrt{448,54^2 - 439,57^2} = 89,26 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu dle vztahu (29):

$$Q_{kom} = 448,54 - 89,26 = 232,26 \text{ kvar}$$

Výpočet potřebného jalového výkonu vč. rezervy výkonu 20 % dle vztahu (30):

$$Q_{kom+20\%} = 1,2 \cdot 232,26 = 278,71 \text{ kvar}$$

Určení skutečného napětí na kondenzátoru dle vztahu (31):

$$U_c = \frac{400}{1 - 0,07} = 430,11 \text{ V}$$

Z katalogu výrobce kondenzátorů [19] zjišťuji, že nejbližší vhodná napěťová hladina použitelných kondenzátorů je 440 V.

Na základě požadavku energetika závodu jsem navrhl navýšení instalovaného kompenzačního výkonu  $Q_i$  nízkonapěťového kompenzačního rozvaděče na 350 kvar a to jak z důvodu současného relativně nízkého zatížení transformátorů T1 a T2, tak i očekávané instalace nové technologie na zpracování kalu z ČOV. Dodatečné navýšení výkonu již instalovaného kompenzačního rozvaděče by bylo problematické a neekonomické.

Skutečný kompenzační výkon kompenzačního rozvaděče dle vztahu (32):

$$Q_{kom/7\%} = \left(\frac{400}{440}\right)^2 \cdot \frac{350}{1 - 0,07} = 311,02 \text{ kvar}$$

Na základě předchozích výpočtů navrhuji instalaci dvou kompenzačních rozvaděčů od výrobce ZEZ SILKO, typ QRF 350 s kondenzátory CSADG 1-0,44 a tlumivkami TKC1 a

TKA1, každý o celkovém instalovaném výkonu 350 kvar. Kompenzační rozvaděč se skládá ze tří polí, jednoho přívodního a řídicího pole a dvěma poli s instalovanými kompenzačními stupni. Rozvaděč je navržený jako devítistupňový s vahou spínání 1:1:2:4:4:4:4:4:4, tím bude dosaženo co možná nejlepší míry vykompenzování sledovaného uzlu sítě.



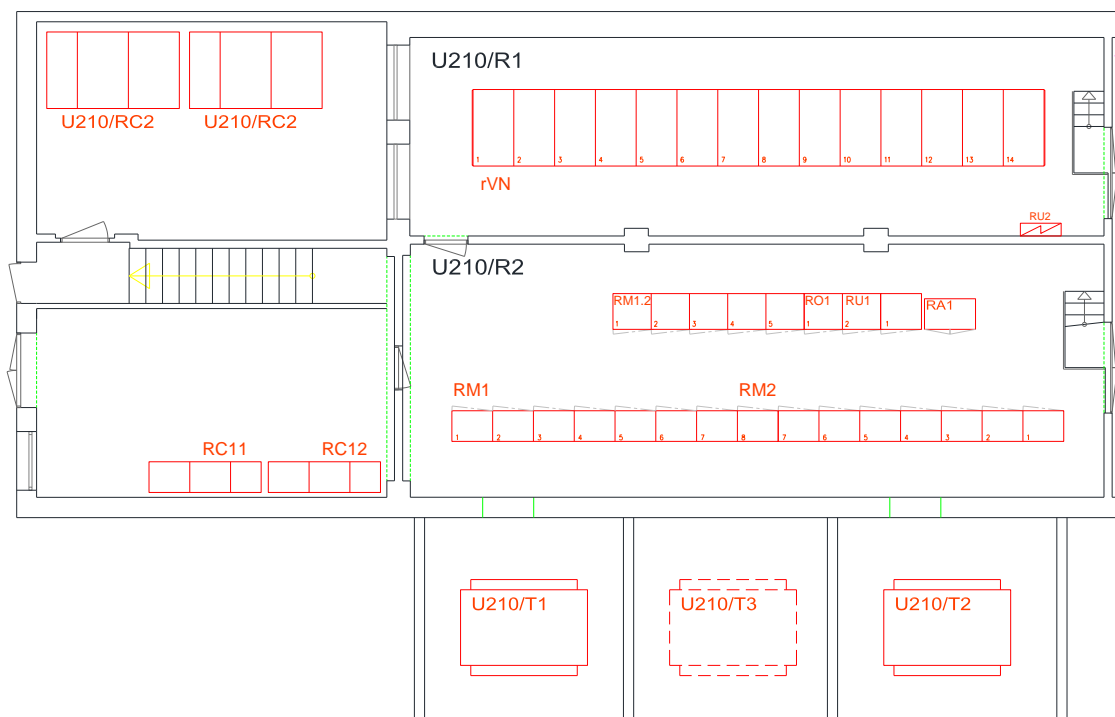
Obr. 35 Chráněný nn kompenzační rozvaděč ZEZ Silko

Nově instalované kompenzační rozvaděče budou připojeny na připravené vývody v rozvaděčích U210/RM1 pole č. 4 (U210/RC11) a U210/RM2 pole č. 4 (U210/RC12). Jmenovitý proud kompenzačního rozvaděče je  $I_N = 449 \text{ A}$ . Dle doporučení výrobce kompenzačního rozvaděče [19], by měl být průřez vodičů dimenzován alespoň na 1,6 až 1,8 násobek jmenovitého proudu rozvaděče. Z tohoto důvodu počítám s instalací tří paralelních přívodních kabelů typu 1–AYKY 3x240+120 pro každý rozvaděč.

#### **Popis instalace rozvaděčů a nutných úprav v rozvodně U210**

- Výroba a instalace nových ocelových rámců pro rozvaděče RC11 a RC12.
- Instalace zvýšené zdvojené podlahy.
- Instalace a sestavení rozvaděčů RC11 a RC12.
- Instalace kabelových tras.
- Pokládka silových kabelů.

- Instalace vzduchotechniky a klimatizační jednotky.
- Instalace protipožárního systému měkkou protipožární ucpávkou.
- Zhotovení výchozí revize na nově instalovaná zařízení.



Obr. 36 Navrhovaná půdorysná dispozice rozvoden U210 (Varianta 2)



## 4 Ekonomická rozvaha realizace kompenzace účiníku

Tato kapitola se zabývá ekonomickým vyhodnocením realizace kompenzace účiníku. V ekonomické rozvaze uvažují jak investiční náklady na pořízení a instalaci kompenzačních rozvaděčů, tak i provozní náklady zahrnující ztráty chráněné kompenzace a náklady na jejich údržbu. Výsledný ekonomický efekt tvoří úspory, které jsou vypočítány ze snížení činných ztrát na přírodních kabelech a zejména úspory za případnou přirážku za nedodržení účiníku.

Uvažují dvě varianty kompenzace účiníku a to kompenzace pouze na straně vysokého napětí (kdy považují vliv na straně nn za zanedbatelný) a kombinaci kompenzace jak na straně vysokého, tak i na straně nízkého napětí.

### 4.1 Investiční náklady

**Varianta 1)** uvažuje s instalací kompenzačních rozvaděčů pouze na hladině vysokého napětí. Jedná se zejména o:

- Instalaci dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 6,3 kV do rozvodny V118 (R214), každý o instalovaném výkonu 700 kvar.
- Instalaci dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 6,3 kV do rozvodny U210, každý o instalovaném výkonu 805 kvar.
- Instalaci kabelových tras.
- Pokládka kabeláže.
- Stavební úpravy, vč. zvednutí podlahy rozvodny U210.
- Instalaci vzduchotechniky a klimatizace pro odvod ztrátového tepla rozvaděčů.

**Varianta 2)** uvažuje s instalací kompenzačních rozvaděčů i na hladině nízkého napětí. Jedná se zejména o:

- Instalaci dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 6,3 kV do rozvodny V118 (R214), každý o instalovaném výkonu 700 kvar.
- Instalaci dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 6,3 kV do rozvodny U210, každý o instalovaném výkonu 500 kvar.
- Instalaci dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 0,4 kV do rozvodny U210, každý o instalovaném výkonu 350 kvar.
- Instalaci kabelových tras.
- Pokládka kabeláže.
- Stavební úpravy, vč. zvednutí podlahy rozvodny U210.
- Instalaci vzduchotechniky a klimatizace pro odvod ztrátového tepla rozvaděčů.

Tab. 9. Porovnání investičních nákladů dle variant [23]

	Varianta 1) (Kč)	Varianta 2) (Kč)
Dodávka dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 700 kvar	1 755 600	1 755 600
Dodávka dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 805 kvar	1 832 600	-
Dodávka dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 500 kvar	-	1 265 000
Dodávka dvou kusů kompenzačních rozvaděčů 350 kvar (nn)	-	455 600
Dozbrojení dvou skříní vývodů V118/rVN (Irodel)	269 000	269 000
Dozbrojení dvou skříní vývodů U210/rVN (NXAir)	281 000	281 000
Instalace, trasy, kabely,...	443 620	688 550
Stavební práce	109 520	242 590
Klimatizace, vzduchotechnika	206 000	303 680
Ostatní (projekt, revize, ...)	196 000	210 000
<b>Cena celkem</b>	<b>5 093 340</b>	<b>5 472 020</b>

## 4.2 Provozní náklady

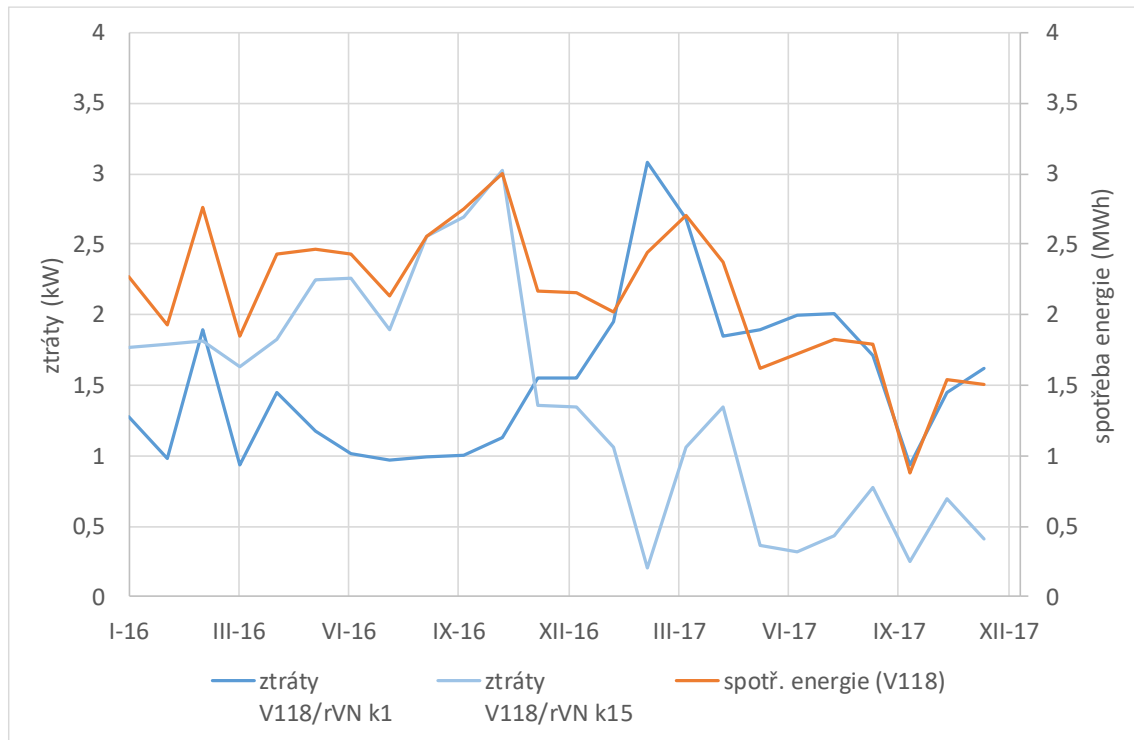
Pro vyhodnocení provozních nákladů po dobu předpokládané životnosti kompenzačních rozvaděčů (15 let) jsou zahrnuté zejména:

- Náklady na provoz zařízení
  - ztráty kompenzačních rozvaděčů,
  - náklady na provoz klimatizačních jednotek.
- Náklady na preventivní údržbu
  - zákonné revize elektrických zařízení,
  - termovizní kontrola (nn zařízení),
  - periodický servis rozvaděčů (kontrola spojů, vyčištění),
  - kontroly a výměny filtrů VZT jednotek.

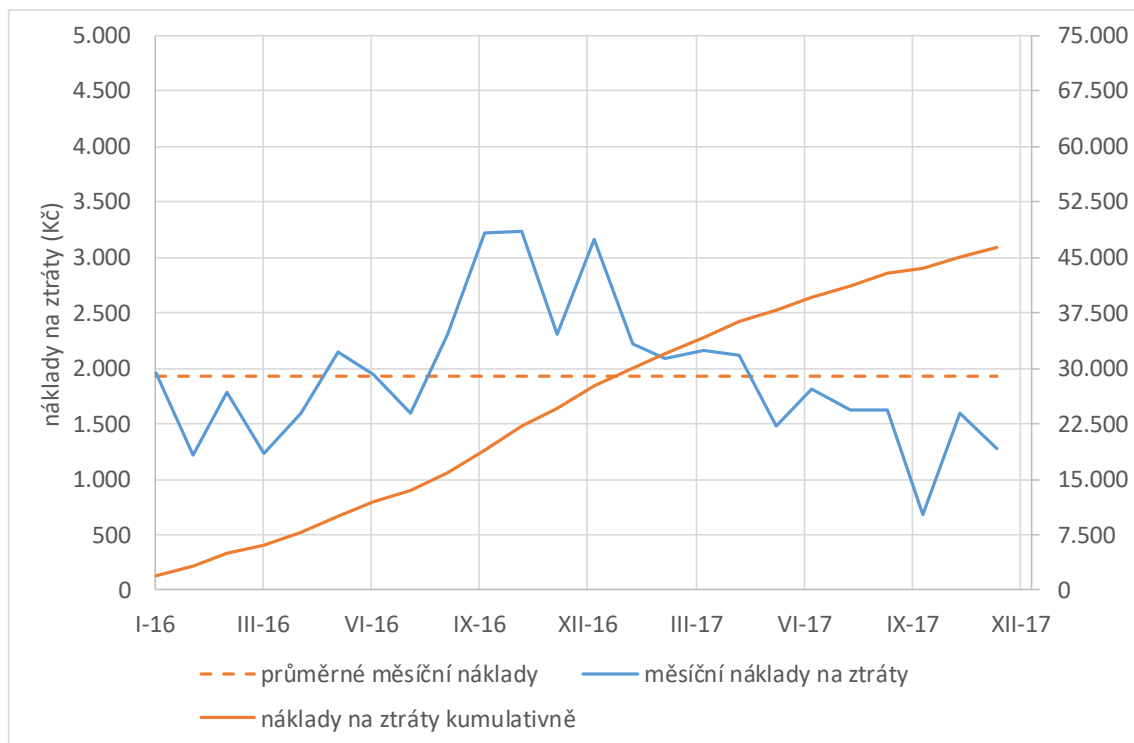
### 4.2.1 Stanovení provozních ztrát kompenzačních rozvaděčů

V případě použití nehrazené kondenzátorové baterie se její měrné ztráty pohybují kolem 0,5 W/kvar. To ovšem neplatí, pokud použijeme chráněnou kondenzátorovou baterii, kdy se měrné ztráty pohybují nejčastěji mezi 5,5 – 7 W/kvar [13]. Provozní ztráty  $\Delta P_{pz}$  vypočítám jako součin měrné ztráty kondenzátorové baterie  $\Delta P_k$  a aktuální potřeby jalového výkonu  $Q_{kom}$  ve stanoveném období.



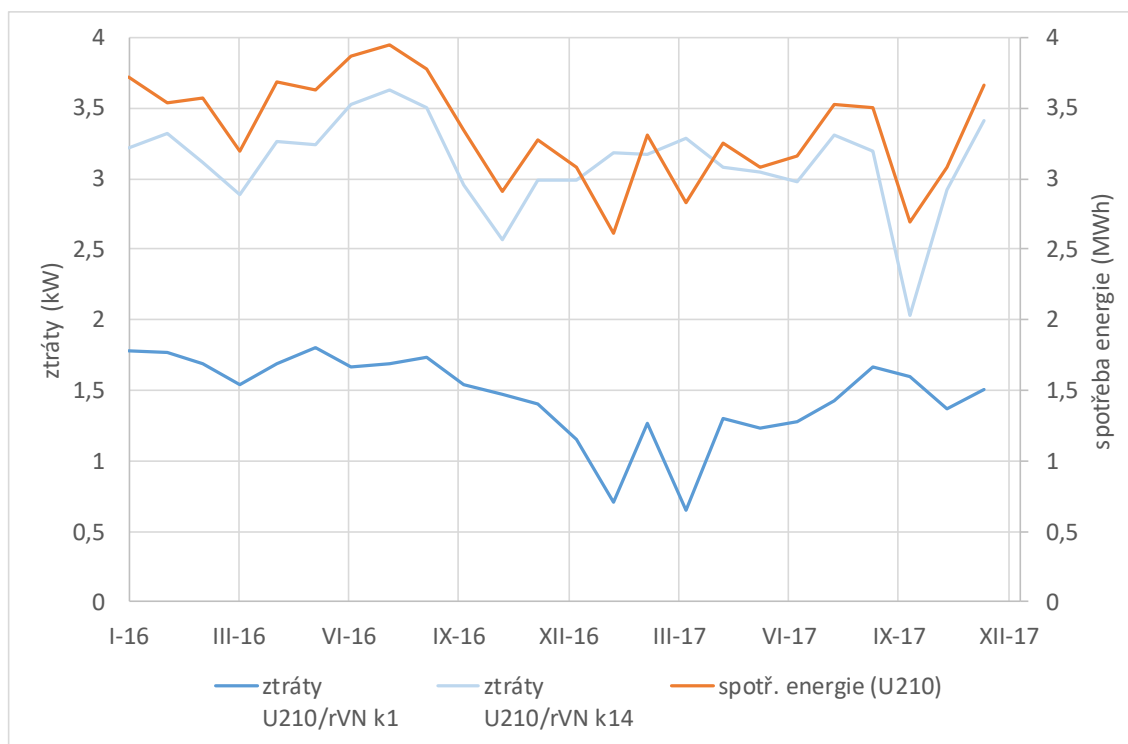


Obr. 37 Ztráty na kompenzaci V118

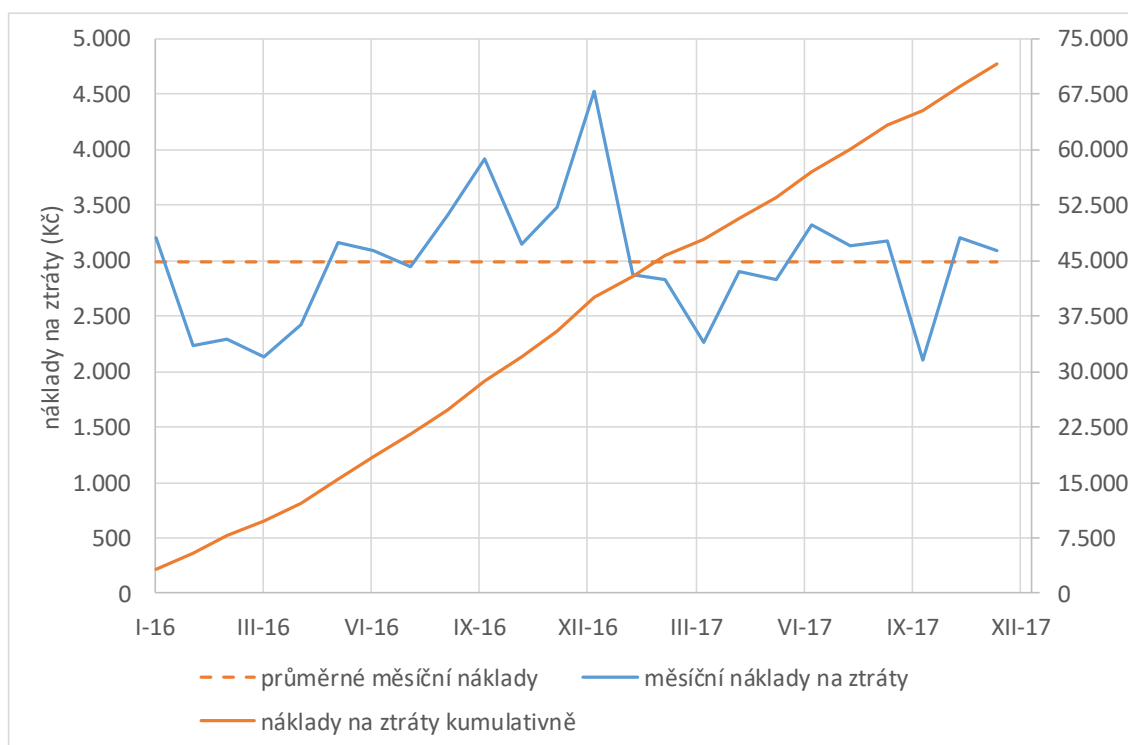


Obr. 38 Náklady na pokrytí ztrát kompenzace V118

Z grafických závislostí (a z přílohy č. 5) je patrné, že celkové náklady na pokrytí ztrát v kompenzaci (za sledované období 2016 a 2017) činí 46 399,0 Kč. Dále uvažují průměrné náklady 1 933,0 Kč/měs.



Obr. 39 Ztráty na kompenzaci U210



Obr. 40 Náklady na pokrytí ztrát kompenzace U210

Z grafických závislostí (a z přílohy č. 6) je patrné, že celkové náklady na pokrytí ztrát v kompenzaci (za sledované období 2016 a 2017) činí 71 668,0 Kč. Dále uvažuji průměrné náklady 2 986,0 Kč/měs.

Potom následné roční náklady na pokrytí ztrát určí prostým vynásobením průměrných měsíčních nákladů.

Tab. 10. Porovnání ročních provozních nákladů [23]

	Varianta 1) (Kč)	Varianta 2) (Kč)
Ztráty kompenzace R214 (V118)	23 196	23 196
Ztráty kompenzace U210	35 832	35 832
Periodický servis	28 300	36 500
Provoz klimatizace a VZT	31 350	47 025
Termovizní kontrola	-	3 500
Periodická revize (1x za 3 roky *)	7 000	8 400
<b>Roční provozní náklady</b>	<b>125 678</b>	<b>154 453</b>

\*) v celkové sumě je cena revize zahrnuta jako poměrná hodnota tzn. 1/3 uvedených nákladů

### 4.3 Úspory

Pro vyhodnocení uspořených nákladů po dobu předpokládané životnosti kompenzačních rozvaděčů (15 let) počítám s následujícími položkami:

- snížení činných ztrát na přívodních kabelech rozvaděčů,
- úspora za přirážku za nedodržení stanovené hodnoty odebíraného účinníku.

#### 4.3.1 Snížení činných ztrát

Ilustrativní výpočet činných ztrát na přívodním vedení pro V118/rVN – k 1 dle tab. 4 za období březen 2017:

$$P = \frac{A_{\xi}}{t} \quad (\text{W}) \quad (41)$$

$$P = \frac{679\,087}{31 \cdot 24} = 912,75 \text{ kW}$$

Výpočet průchozího proudu na přívodních kabelech před kompenzací:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} \quad (\text{A}) \quad (42)$$

$$I = \frac{912,75}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 0,825} = 101,41 \text{ A}$$

Výpočet průchozího proudu na přívodních kabelech po kompenzaci na účinník 0,98:

$$I_{0,98} = \frac{912,75}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 0,98} = 85,35 \text{ A} \quad (\text{A}) \quad (43)$$

Přívodní vedení pro rozvaděče rVN jsou realizovány paralelními kabelem typu 6–AYKCY 3x240/25 pro každé přívodní pole. Hodnota činného odporu, která je dána výrobcem kabelu typu 6-AYKCY 3x240/25 [20]:

- činný odpor kabelu  $R_{K(km)}$ ..... 0,125  $\Omega$ /km
- délka kabelového vedení  $l$ ..... 1,2 km

$$R'_K = R_{K(km)} \cdot l = 0,125 \cdot 1,2 = 0,15 \Omega$$

Přívodní vedení pro rozvaděč V118/rVN je realizován třemi paralelními kabelem, potom:

$$R_{K(V118)} = \frac{R'_K}{3} = 0,05 \Omega$$

Přívodní vedení pro rozvaděč U210/rVN je realizován čtyřmi paralelními kabelem, potom:

$$R_{K(U210)} = \frac{R'_K}{4} = 0,0375 \Omega$$

Úsporu elektrické energie určím z rozdílu činných ztrát, které jsou dány průchozím proudem kabely (před a po kompenzaci):

$$\Delta P = 3 \cdot R_K \cdot (I^2 - I_{0,98}^2) \quad (\text{W}) \quad (44)$$

$$\Delta P = 3 \cdot 0,05 \cdot (101,41^2 - 85,35^2) = 449,9 \text{ W}$$

$$\Delta A_{(\text{měsíc})} = \Delta P \cdot t \quad (\text{Wh}) \quad (45)$$

$$\Delta A_{(III-17)} = 449,9 \cdot 31 \cdot 24 = 334,7 \text{ kWh}$$

Pro výpočet měsíční finanční úspory vycházím z průměrných měsíčních cen elektrické energie, které jsem obdržel od energetika závodu a jsou stanoveny dle denního trhu pro daný měsíc [21]:

$$\Delta C_{\check{C}Z} = \Delta A_{\text{měsíc}} \cdot C_E \quad (\text{Kč}) \quad (46)$$

$$\Delta C_{\check{C}Z(III-17)} = 334,7 \cdot 0,8561 = 286,6 \text{ Kč}$$

Pro další výpočty úspor snížením činných ztrát (viz tabulky v příloze) uvažuji:

- V118	191 Kč/měsíc
- U210	360 Kč/měsíc

#### 4.3.2 Úspora za případnou přírážku za nedodržení účinníku

Stanovení ceny  $C_p$  za nedodržení účinníku dle [10]:

$$C_p = [P_{max} \cdot c_{rk} \cdot u] + [(c_{ps} + c_{se}) \cdot u \cdot W] \quad (\text{Kč}) \quad (47)$$

$P_{max}$	nejvyšší naměřený čtvrt hodinový výkon za vyhodnocované období	(MW)
$c_{rk}$	cena za rezervovanou kapacitu na příslušné napěťové hladině	(Kč/MW)
$u$	přírážka za nedodržení účinníku podle tab. 2.	(-)
$c_{ps}$	cena za použití sítě na příslušné napěťové hladině	(Kč/MWh)
$c_{se}$	cena za silovou elektřinu podle tabulky uvedené v [10]	(Kč/MWh)
$W$	množství elektřiny za vyhodnocované období	(MWh)

Na základě Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 6/2017 ze dne 21. listopadu 2017 [10], byly stanoveny tyto ceny:

Cena za rezervovanou kapacitu na hladině vvn	71 304,00 Kč/MW
Cena za použití sítě na napěťové hladině vvn	27,85 Kč/MW
Cena za silovou elektřinu	948,25 Kč/MW

Provozovatelem distribuční soustavy je společnost ČEZ Distribuce a.s., připojení podnikové sítě na distribuční soustavu je provedeno na hladině vvn.



Příklad výpočtu ceny  $C_p$  dle vztahu (47) (hodnoty jsou použité z tab. 4):

$$C_{p(V118\ k1)} = [0,9552 \cdot 71\ 304 \cdot 0,1238] + [(27,85 + 948,25) \cdot 0,1238 \cdot 0,9791]$$

$$C_{p(V118\ k1)} = 90\ 494\ \text{Kč}$$

Přirážka za nedodržení účinníku jedné poloviny rozvaděče V118/rVN (kobka č. 1) za období měsíce března 2017 byla vypočítána na částku 90 494 Kč.

Při dodržení předepsaného odebíraného účinníku, uvažuji pro další výpočty s úsporou finančních prostředků, které nebudou vynaloženy na přirážku uloženou dodavatelem elektrické energie (viz tabulky v příloze č. 9 až 12):

- V118	91 265 Kč/měsíc
- U210	176 525 Kč/měsíc

#### 4.4 Výpočet návratnosti

Pro výpočet návratnosti instalace kompenzačních rozvaděčů jsem použil sledování finančních toků CF (Cash Flow). Při výpočtu jsem vycházel z předpokladu, že investice proběhne v „nultém“ roce doby života a provozní náklady vznikají až v následujících letech. Pro zjednodušení nebylo uvažováno s nárůstem cen energií a uvažoval jsem pevnou diskontní úrokovou míru 2 %. Jako finanční ukazatel jsem použil čistou současnou hodnotu NPV (Net Present Value). [22]

$$NPV = \sum_0^t DCF_t \quad (\text{Kč}) \quad (48)$$

$$DCF_t = \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (\text{Kč}) \quad (49)$$

$DCF_t$	diskontovaný peněžní tok v daném roce t	(Kč)
$CF_t$	generovaný peněžní tok v daném roce t	(Kč)
$r$	diskontní úroková míra	(%)
$t$	doba životnosti (sledovaná doba)	(rok)

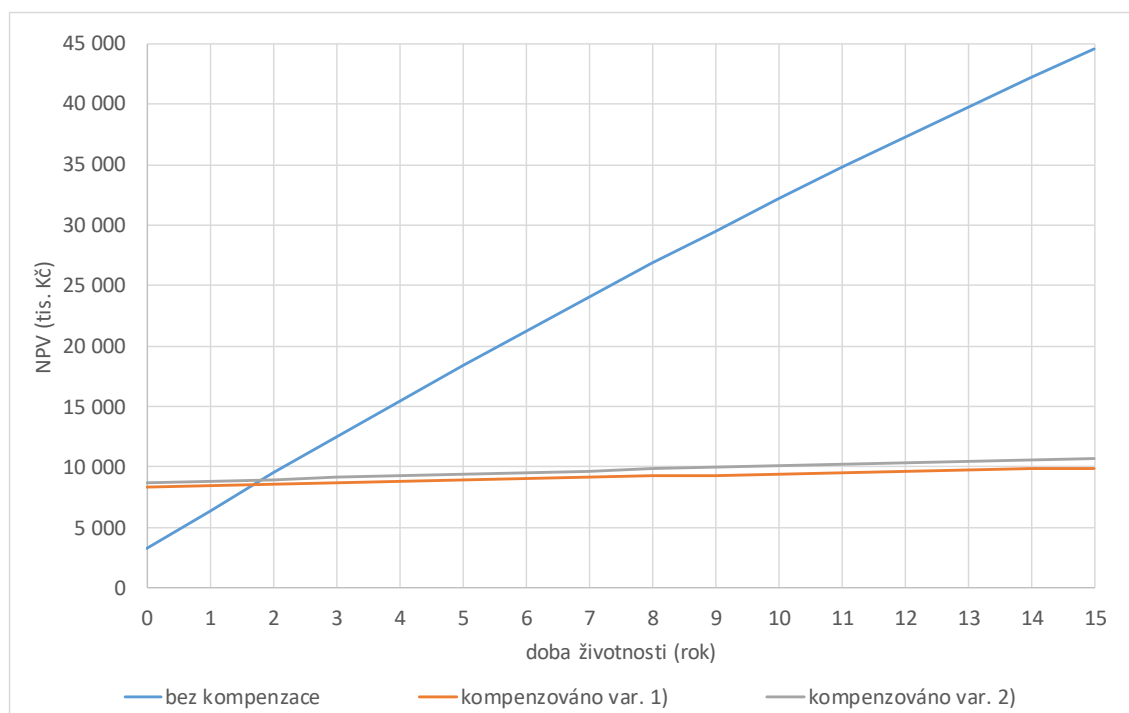
V „nultém“ roce doby života instalovaného zařízení bude nutné vynaložit finanční prostředky nejen na dodávku a instalaci kompenzačních rozvaděčů, ale i na úhradu uložené přirážky za nedodržení předepsaného odebíraného účinníku. V dalších, následujících letech již nebude podnik sankcionován přirážkou a tím mu ve značné míře klesnou výdaje.

Tab. 11. Čistá současná hodnota (diskontovaná) [23]

t (rok)	bez kompenzace		varianta 1)		varianta 2)	
	DCF <sub>t</sub>	NPV <sub>t</sub>	DCF <sub>t</sub>	NPV <sub>t</sub>	DCF <sub>t</sub>	NPV <sub>t</sub>
0	3 220	3 220	8 313	8 313	8 692	8 692
1	3 157	6 377	123	8 437	151	8 844
2	3 095	9 472	121	8 557	148	8 992
3	3 034	12 507	118	8 676	146	9 138
4	2 975	15 481	116	8 792	143	9 280
5	2 917	18 398	114	8 906	140	9 420
6	2 859	21 257	112	9 017	137	9 557
7	2 803	24 061	109	9 127	134	9 692
8	2 748	26 809	107	9 234	132	9 824
9	2 694	29 503	105	9 339	129	9 953
10	2 642	32 145	103	9 442	127	10 080
11	2 590	34 735	101	9 543	124	10 204
12	2 539	37 274	99	9 643	122	10 326
13	2 489	39 763	97	9 740	119	10 445
14	2 440	42 203	95	9 835	117	10 562
15	2 393	44 596	93	9 928	115	10 677

Uvedené hodnoty jsou pro předpokládanou diskontní sazbu 2 %.

Diskontovaný finanční tok daného roku (DCF<sub>t</sub>) a kumulovaná současná hodnota daného roku (NPV<sub>t</sub>) jsou uvedeny v tisících Kč.



Obr. 41 Graf čisté současné hodnoty pro jednotlivé varianty

Z grafu je patrné, že doba návratnosti obou variant je nižší než dva roky. Pomocí tabulkového kalkulátoru jsem určil návratnost:

- varianta 1) 1,69 roku
- varianta 2) 1,84 roku

## 5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou a návrhem kompenzace účinníku v podniku Mondi Štětí a.s. V úvodu je shrnuta problematika kompenzace účinníku a popis jednotlivých možností kompenzace. Praktická část je zaměřena na konkrétní návrh kompenzačních prostředků v části podnikové sítě.

Z provedeného měření, analýzy získaných dat a návrhu kompenzačních rozvaděčů vyplývá, že pro průmyslový podnik takové velikosti, jako je Mondi Štětí a.s., má velký význam zabývat se kompenzací účinníku, jelikož případná platba za nedodržení závazného účinníku odebírané elektrické energie je vysoká a může dosahovat i několika stovek tisíc korun měsíčně.

Pro kompenzaci jalového výkonu rozvoden V118 a R214 jsem navrhnul dva kompenzační rozvaděče na straně vysokého napětí, každý o instalovaném kompenzačním výkonu 700 kvar. Tento výkon je navržený s dostatečnou rezervou pro případ možných nepříznivých provozních stavů. Z důvodu stávající půdorysné dispozice rozvodny zde není možná instalace kompenzace na straně nízkého napětí.

V případě kompenzace rozvoden U210 jsem navrhnul dvě možné varianty. První varianta počítá s kompenzací účinníku pouze na straně vysokého napětí o instalovaném výkonu 2 x 805 kvar. Druhá, technicky vhodnější varianta, počítá s instalací dvou kompenzačních rozvaděčů o výkonu 500 kvar pro kompenzaci asynchronních motorů a dvou kusů rozvaděčů na straně nízkého napětí pro kompenzaci odběrů sekundární strany distribučních transformátorů. Tato varianta je investičně náročnější a to zejména z důvodu nutnosti větších stavebních úprav a instalace dodatečného klimatizačního zařízení do další místnosti.

Obě zmiňované varianty kompenzace účinníku splňují požadavky energetika závodu pro zadanou oblast. Protože prostá doba návratnosti u obou variant je nižší než dva roky, jeví se tato investice jako ekonomicky výhodná.

Uvedená diplomová práce byla předložena vedení společnosti jako případová studie s návrhem možného protipatření rizika vznikajícího z nedodržení požadovaného účinníku a její závěry budou dále využity jako podklad pro zpracování projektové dokumentace.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008, 364 s. ISBN 978-80-7225-291-6.
- [2] KORENC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. vydání, Praha: IN-EL, 1999, 127 s. ISBN 80-862-3007-4
- [3] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vydání, Praha: BEN – technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-730-0164-0.
- [4] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vydání, Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [5] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vydání Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2003, 195 s. ISBN 80-7082-976-1
- [6] KŮS, Václav, Jiří SKÁLA a Jiří HAMMERBAUER. *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. 1. vydání, Praha: BEN – technická literatura, 2013, 374 s. ISBN 978-80-7300-476-7
- [7] KYSELA, Ladislav a Jiří TOMČALA. *Vodní hospodářství v energetice*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001, 99 s. ISBN 80-7078-752-X.
- [8] ČSN 33 3080. *Kompenzace indukčního výkonu statickými kondenzátory*. Praha, Český normalizační institut, 1979, 24 s
- [9] SÝKOROVSKÝ, Jan. *Kompenzace jalového výkonu v průmyslovém podniku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [10] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 6/2017* [online]. Praha, Energetický regulační úřad [cit. 2017-03-17], 2017, 86 s. Dostupné z: <[http://www.eru.cz/documents/10540/2887244/ERV\\_8\\_2017.pdf/96b4e385-52f3-48ac-a446-fc588182b5cb](http://www.eru.cz/documents/10540/2887244/ERV_8_2017.pdf/96b4e385-52f3-48ac-a446-fc588182b5cb)>
- [11] KOŠŤÁL, Josef. *Kompenzace elektrického jalového výkonu* [online]. Časopis ELEKTRO 3/2009. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38682.pdf>>
- [12] MIKEŠ, Jan. *Zlepšení účinníku* [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <<https://elektrika.cz/data/clanky/zlepseni-uciniku>>
- [13] MOLNÁR, Miloš. *Zlepšení účinníku v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků* [online]. EMCOS s.r.o., Teplice, 2016. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <[http://www.emcos.cz/files/files/1478173666\\_zlepseni-uciniku-mm-2001.pdf](http://www.emcos.cz/files/files/1478173666_zlepseni-uciniku-mm-2001.pdf)>

- [14] *Trojfázové asynchronní motory s rotorem nakrátko 1LG4, 1LG6* [online]. Siemens, s.r.o. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <[http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data\\_files/katalogy/k15/cat\\_k15\\_2012-02\\_cz.pdf](http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/katalogy/k15/cat_k15_2012-02_cz.pdf)>
- [15] *Svařovací automat Fronius* [online]. Promont a.s. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <<http://www.promont-as.cz/technologie/svarovani/>>
- [16] TOPIČ, Petr. *Jako uvnitř tanku, ale 80 metrů nad zemí. Jak se řídí větrná elektrárna* [online]. Mafra a.s. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <[https://technet.idnes.cz/foto.aspx?r=tec\\_reportaze&c=A160919\\_145404\\_tec\\_reportaze\\_top&foto=TOP66139d\\_n.JPG](https://technet.idnes.cz/foto.aspx?r=tec_reportaze&c=A160919_145404_tec_reportaze_top&foto=TOP66139d_n.JPG)>
- [17] *Kompenzace jalového výkonu* [online]. KBH Energy a.s. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <<http://www.kbh.cz/o-kompenzaci/zaklady-kompenzace/kompenzace-jaloveho-vykonu>>
- [18] *Prospekt regulátorů jalového výkonu Novar* [online]. KBH Energy a.s. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <[http://www.kbh.cz/images/pdf/cesky/NOVAR\\_1xxx\\_-\\_Prospekt.pdf](http://www.kbh.cz/images/pdf/cesky/NOVAR_1xxx_-_Prospekt.pdf)>
- [19] *Kompenzace jalové energie* [online]. ZEZ Silko, s.r.o. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <<https://www.zez-silko.cz/customzone/files/pfcnew.pdf>>
- [20] *Katalog kabelů 6-AYKCY* [online]. NKT Cables s.r.o. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <[http://81.0.246.66/nkt\\_pk/datasheets\\_pdf/6-AYKCY\\_3zil.pdf](http://81.0.246.66/nkt_pk/datasheets_pdf/6-AYKCY_3zil.pdf)>
- [21] *Denní trh* [online]. Praha, OTE, a.s. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <<http://www.ote-cr.cz/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh>>
- [22] ZIKMUND, Martin. *Hodnocení investic: Čistá současná hodnota (NPV) stručně a jasně* [online]. BusinessVize. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <<http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/hodnoceni-investic-cista-soucasna-hodnota-npv-strucne-a-jasne>>
- [23] Interní zdroje MONDI Štětí, a.s.

## Přílohy

### Příloha č. 1 - Naměřené a vypočítané hodnoty rozvaděče V118/rVN – k 1

rok	měsíc	$A_{\xi}$ (kWh)	$A_j$ (kvarh)	$\cos\varphi$ (-)	$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\text{kom}}$ (kvar)	$Q_{\text{kom}+20\%}$ (kvar)
2016	leden	553.956	247.968	0,913	941,0	182,10	218,52
	únor	403.941	179.951	0,913	974,9	140,70	168,84
	březen	740.525	352.204	0,903	1 100,6	271,28	325,54
	duben	373.084	171.949	0,908	1 100,7	133,60	160,32
	květen	525.541	260.765	0,896	968,5	207,06	248,47
	červen	374.652	196.930	0,885	1 100,7	167,85	201,42
	červenec	431.505	195.630	0,911	1 100,7	145,17	174,21
	srpen	424.152	188.952	0,913	956,0	138,20	165,85
	září	412.668	185.892	0,912	926,0	141,80	170,16
	říjen	434.783	195.258	0,912	974,9	143,78	172,53
	listopad	456.230	209.182	0,909	974,9	161,86	194,23
	prosinec	412.966	249.165	0,856	627,7	222,19	266,63
2017	leden	394.946	245.362	0,849	560,8	222,00	266,39
	únor	422.890	273.031	0,840	957,4	278,51	334,21
	březen	679.087	465.512	0,825	955,2	440,35	528,42
	duben	690.116	416.378	0,856	1 016,7	383,67	460,41
	květen	709.641	340.099	0,902	1 029,9	263,44	316,13
	červen	710.364	338.613	0,903	1 100,6	269,95	323,95
	červenec	809.999	376.995	0,907	1 165,6	285,64	342,77
	srpen	826.161	381.637	0,908	1 186,1	287,47	344,96
	září	615.339	301.423	0,898	1 080,1	245,10	294,12
	říjen	310.939	162.061	0,887	746,8	132,96	159,55
	listopad	472.214	244.542	0,888	778,9	206,47	247,76
	prosinec	539.781	281.681	0,887	782,2	231,28	277,54

## Příloha č. 2 - Naměřené a vypočítané hodnoty rozvaděče V118/rVN – k 15

rok	měsíc	$A_{\xi}$ (kWh)	$A_j$ (kvarh)	$\cos\varphi$ (-)	$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\text{kom}}$ (kvar)	$Q_{\text{kom}+20\%}$ (kvar)
2016	leden	603 804	310 932	0,889	836,6	253,12	303,75
	únor	558 233	291 661	0,886	857,1	256,19	307,43
	březen	583 049	311 799	0,882	847,2	259,95	311,94
	duben	534 272	276 842	0,888	880,7	233,82	280,59
	květen	544 735	304 340	0,873	833,4	260,39	312,46
	červen	548 184	342 592	0,848	842,9	321,22	385,46
	červenec	660 019	373 943	0,870	969,5	322,47	386,97
	srpen	614 610	326 541	0,883	889,4	271,15	325,39
	září	629 000	390 570	0,850	965,5	365,06	438,08
	říjen	539 923	395 237	0,807	884,8	383,87	460,65
	listopad	561 322	425 345	0,797	856,2	432,45	518,94
	prosinec	285 011	202 593	0,815	453,7	194,51	233,42
2017	leden	295 281	203 390	0,824	403,9	192,78	231,34
	únor	256 453	153 782	0,858	453,1	151,35	181,62
	březen	300 586	82 679	0,964	472,6	29,09	34,91
	duben	291 896	168 951	0,865	522,6	152,33	182,80
	květen	292 290	202 513	0,822	400,0	192,42	230,90
	červen	271 966	92 215	0,947	746,1	51,37	61,65
	červenec	270 796	89 060	0,950	839,5	45,80	54,96
	srpen	290 651	105 433	0,940	456,0	62,38	74,86
	září	279 165	136 164	0,899	416,6	110,39	132,46
	říjen	269 222	80 836	0,958	746,1	35,17	42,21
	listopad	307 451	133 406	0,917	839,5	98,58	118,29
	prosinec	289 841	102 661	0,943	839,5	58,88	70,66

## Příloha č. 3 - Naměřené a vypočítané hodnoty rozvaděče U210/rVN – k 1

rok	měsíc	A <sub>ž</sub> (kWh)	A <sub>j</sub> (kvarh)	cosφ (-)	P <sub>max</sub> (kW)	Q <sub>kom</sub> (kvar)	Q <sub>kom+20%</sub> (kvar)
2016	leden	646 128	320 640	0,896	930,0	254,62	305,55
	únor	592 248	295 644	0,895	959,5	251,99	302,38
	březen	615 920	304 278	0,897	887,0	240,87	289,05
	duben	528 900	265 980	0,893	917,0	220,25	264,30
	květen	625 248	306 960	0,898	892,5	241,93	290,32
	červen	607 476	308 964	0,891	1 660,0	257,79	309,35
	červenec	606 108	300 384	0,896	913,5	238,32	285,98
	srpen	633 720	307 596	0,900	896,0	240,48	288,57
	září	603 504	301 284	0,895	919,0	248,25	297,90
	říjen	615 655	288 293	0,906	947,5	219,46	263,35
	listopad	597 480	272 496	0,910	937,5	209,96	251,95
	prosinec	586 812	268 836	0,909	921,5	201,18	241,42
2017	leden	459 432	215 784	0,905	948,0	164,64	197,57
	únor	251 268	119 100	0,904	980,5	101,31	121,57
	březen	566 525	249 958	0,915	935,5	181,34	217,61
	duben	276 720	122 736	0,914	953,5	92,42	110,91
	květen	555 156	250 896	0,911	918,0	185,71	222,85
	červen	522 540	233 076	0,913	915,0	176,35	211,62
	červenec	572 976	251 628	0,916	874,5	181,83	218,19
	srpen	613 260	276 564	0,912	889,5	204,35	245,22
	září	660 600	305 280	0,908	2 560,5	237,69	285,23
	říjen	616 842	294 671	0,902	2 603,0	227,71	273,25
	listopad	590 856	260 544	0,915	921,5	195,23	234,28
	prosinec	662 640	294 444	0,914	941,5	214,90	257,89



## Příloha č. 4 - Naměřené a vypočítané hodnoty rozvaděče U210/rVN – k 14

rok	měsíc	$A_{\xi}$ (kWh)	$A_j$ (kvarh)	$\cos\varphi$ (-)	$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\text{kom}}$ (kvar)	$Q_{\text{kom}+20\%}$ (kvar)
2016	leden	1 089 540	562 872	0,888	1 837,0	459,18	551,02
	únor	1 075 776	548 712	0,891	1 812,0	474,52	569,42
	březen	1 043 749	542 687	0,887	1 715,5	444,55	533,46
	duben	951 480	490 656	0,889	1 761,0	413,12	495,75
	květen	1 082 436	566 592	0,886	1 811,0	466,12	559,35
	červen	1 050 024	546 708	0,887	1 682,0	463,18	555,82
	červenec	1 190 844	617 040	0,888	1 938,0	504,34	605,21
	srpen	1 209 240	630 876	0,887	1 693,0	517,92	621,50
	září	1 120 380	587 652	0,886	1 689,0	500,21	600,25
	říjen	1 046 927	526 629	0,893	1 749,5	422,10	506,52
	listopad	914 832	449 964	0,897	1 802,0	366,94	440,33
	prosinec	1 145 220	550 308	0,901	1 817,0	427,10	512,52
2017	leden	1 116 324	544 836	0,899	1 831,5	427,63	513,16
	únor	1 097 400	528 000	0,901	1 827,0	454,11	544,93
	březen	1 168 125	574 354	0,897	1 770,5	453,17	543,80
	duben	1 182 504	577 692	0,899	1 734,5	468,85	562,62
	květen	1 128 984	556 152	0,897	1 741,0	439,38	527,26
	červen	1 048 416	526 380	0,894	1 703,0	435,40	522,48
	červenec	1 034 136	525 900	0,891	1 689,0	424,61	509,53
	srpen	1 189 596	592 992	0,895	1 678,5	472,36	566,83
	září	1 163 784	565 452	0,899	2 596,5	457,13	548,56
	říjen	739 356	365 621	0,896	1 690,5	289,64	347,56
	listopad	1 034 484	510 084	0,897	1 760,5	416,70	500,04
	prosinec	1 273 608	621 624	0,899	1 803,5	487,91	585,49

## Příloha č. 5 - Provozní ztráty rozvaděče V118/rVN

období	V118/rVN - k 1		V118/rVN - k 15		A <sub>pz</sub> *) (MWh)	C <sub>E</sub> **) (Kč/MWh)	C <sub>pz</sub> (Kč)
	Q <sub>kom</sub> (kvar)	ΔP <sub>pz</sub> (kW)	Q <sub>kom</sub> (kvar)	ΔP <sub>pz</sub> (kW)			
I-16	182,1	1,27	253,1	1,77	2,27	861,9	1 954
II-16	140,7	0,98	256,2	1,79	1,93	631,8	1 222
III-16	271,3	1,90	260,0	1,82	2,77	642,4	1 777
IV-16	133,6	0,94	233,8	1,64	1,85	667,8	1 237
V-16	207,1	1,45	260,4	1,82	2,43	658,1	1 602
VI-16	167,9	1,17	321,2	2,25	2,46	869,6	2 144
VII-16	145,2	1,02	322,5	2,26	2,44	797,5	1 942
VIII-16	138,2	0,97	271,2	1,90	2,13	746,7	1 592
IX-16	141,8	0,99	365,1	2,56	2,55	902,8	2 306
X-16	143,8	1,01	383,9	2,69	2,75	1 173,5	3 225
XI-16	161,9	1,13	432,4	3,03	3,00	1 081,8	3 240
XII-16	222,2	1,56	194,5	1,36	2,17	1063	2 307
I-17	222,0	1,55	192,8	1,35	2,16	1 466,5	3 168
II-17	278,5	1,95	151,3	1,06	2,02	1 097,6	2 219
III-17	440,3	3,08	29,1	0,20	2,44	856,1	2 093
IV-17	383,7	2,69	152,3	1,07	2,70	798,7	2 158
V-17	263,4	1,84	192,4	1,35	2,37	890,3	2 114
VI-17	270,0	1,89	51,4	0,36	1,62	916,5	1 484
VII-17	285,6	2,00	45,8	0,32	1,73	1050	1 812
VIII-17	287,5	2,01	62,4	0,44	1,82	890,1	1 622
IX-17	245,1	1,72	110,4	0,77	1,79	906,2	1 624
X-17	133,0	0,93	35,2	0,25	0,88	783	686
XI-17	206,5	1,45	98,6	0,69	1,54	1 040,1	1 599
XII-17	231,3	1,62	58,9	0,41	1,51	842,7	1 273
<b>celkové náklady za dvouleté období</b>						<b>46 399,0 Kč</b>	
<b>průměrné měsíční náklady</b>						<b>1 933,0 Kč</b>	

\*) spotřebovaná energie za sledované období

\*\*) C<sub>E</sub> – cena elektrické energie ve sledovaném období

## Příloha č. 6 - Provozní ztráty rozvaděče U210/rVN

období	U210/rVN - k 1		U210/rVN - k 14		A <sub>pz</sub> *) (MWh)	C <sub>E</sub> **) (Kč/MWh)	C <sub>pz</sub> (Kč)
	Q <sub>kom</sub> (kvar)	ΔP <sub>pz</sub> (kW)	Q <sub>kom</sub> (kvar)	ΔP <sub>pz</sub> (kW)			
I-16	254,6	1,78	459,2	3,21	3,72	861,9	3 204
II-16	252,0	1,76	474,5	3,32	3,54	631,8	2 236
III-16	240,9	1,69	444,5	3,11	3,57	642,4	2 293
IV-16	220,3	1,54	413,1	2,89	3,19	667,8	2 132
V-16	241,9	1,69	466,1	3,26	3,69	658,1	2 427
VI-16	257,8	1,80	463,2	3,24	3,63	869,6	3 160
VII-16	238,3	1,67	504,3	3,53	3,87	797,5	3 085
VIII-16	240,5	1,68	517,9	3,63	3,95	746,7	2 949
IX-16	248,2	1,74	500,2	3,50	3,77	902,8	3 406
X-16	219,5	1,54	422,1	2,95	3,34	1 173,5	3 921
XI-16	210,0	1,47	366,9	2,57	2,91	1 081,8	3 145
XII-16	201,2	1,41	427,1	2,99	3,27	1063	3 478
I-17	164,6	1,15	427,6	2,99	3,08	1 466,5	4 523
II-17	101,3	0,71	454,1	3,18	2,61	1 097,6	2 868
III-17	181,3	1,27	453,2	3,17	3,30	856,1	2 829
IV-17	92,4	0,65	468,9	3,28	2,83	798,7	2 259
V-17	185,7	1,30	439,4	3,08	3,26	890,3	2 898
VI-17	176,3	1,23	435,4	3,05	3,08	916,5	2 826
VII-17	181,8	1,27	424,6	2,97	3,16	1 050,0	3 316
VIII-17	204,3	1,43	472,4	3,31	3,52	890,1	3 137
IX-17	237,7	1,66	457,1	3,20	3,50	906,2	3 173
X-17	227,7	1,59	289,6	2,03	2,69	783,0	2 110
XI-17	195,2	1,37	416,7	2,92	3,08	1 040,1	3 208
XII-17	214,9	1,50	487,9	3,42	3,66	842,7	3 085
<b>celkové náklady za dvouleté období</b>						<b>71 668,0 Kč</b>	
<b>průměrné měsíční náklady</b>						<b>2 986,0 Kč</b>	

\*) spotřebovaná energie za sledované období

\*\*) C<sub>E</sub> – cena elektrické energie ve sledovaném období

## Příloha č. 7 - Výpočet snížení činných ztrát po kompenzaci V118

období	V118/rVN – k 1				V118/rVN – k 15				Ačz (kWh)	Cčz (Kč)
	P (kW)	I (A)	I <sub>(0,98)</sub> (A)	ΔP <sub>(k1)</sub> (W)	P (kW)	I (A)	I <sub>(0,98)</sub> (A)	ΔP <sub>(k15)</sub> (W)		
I-16	745	74,8	69,6	111,1	812	83,7	75,9	185,8	220,9	190
II-16	580	58,2	54,3	66,7	802	82,9	75,0	187,8	177,1	112
III-16	995	101,0	93,1	230,9	784	81,4	73,3	189,4	312,6	201
IV-16	518	52,3	48,5	57,9	742	76,6	69,4	157,6	155,2	104
V-16	706	72,3	66,1	128,8	732	76,9	68,5	183,0	232,0	153
VI-16	520	53,9	48,7	80,2	761	82,3	71,2	255,1	241,4	210
VII-16	580	58,4	54,2	69,6	887	93,4	83,0	277,4	258,2	206
VIII-16	570	57,2	53,3	64,4	826	85,7	77,3	207,2	202,1	151
IX-16	573	57,6	53,6	66,9	874	94,2	81,7	331,1	286,5	259
X-16	584	58,7	54,6	69,0	726	82,4	67,9	328,2	295,5	347
XI-16	634	63,9	59,3	85,5	780	89,6	72,9	408,1	355,4	384
XII-16	555	59,4	51,9	125,3	383	43,1	35,8	85,8	157,0	167
I-17	531	57,3	49,6	122,4	397	44,2	37,1	86,0	155,0	227
II-17	629	68,6	58,8	187,4	382	40,8	35,7	58,4	165,2	181
III-17	913	101,4	85,4	449,9	404	38,4	37,8	7,1	340,0	291
IV-17	958	102,6	89,6	373,6	405	42,9	37,9	60,8	312,8	250
V-17	954	96,9	89,2	216,0	393	43,8	36,7	85,3	224,2	200
VI-17	987	100,2	92,3	228,1	378	36,6	35,3	13,3	173,8	159
VII-17	1 089	110,0	101,8	261,9	364	35,1	34,0	11,2	203,2	213
VIII-17	1 110	112,1	103,8	267,4	391	38,1	36,5	17,4	211,9	189
IX-17	855	87,2	79,9	182,8	388	39,5	36,3	37,2	158,5	144
X-17	418	43,2	39,1	50,7	362	34,6	33,8	8,1	43,7	34
XI-17	656	67,7	61,3	123,0	427	42,7	39,9	33,8	112,9	117
XII-17	726	75,0	67,8	153,2	390	37,9	36,4	16,1	126,0	106
<b>celkové úspory činných ztrát za dvouleté období</b>									<b>4 595 Kč</b>	
<b>průměrné měsíční úspory</b>									<b>191 Kč</b>	

## Příloha č. 8 - Výpočet snížení činných ztrát po kompenzaci U210

období	U210/rVN – k 1				U210/rVN – k 14				Ačz (kWh)	Cčz (Kč)
	P (kW)	I (A)	I <sub>(0,98)</sub> (A)	ΔP <sub>(k1)</sub> (W)	P (kW)	I (A)	I <sub>(0,98)</sub> (A)	ΔP <sub>(k14)</sub> (W)		
I-16	868	88,8	81,2	146,1	1 464	151,1	136,9	448,9	220,9	387
II-16	851	87,2	79,6	142,3	1 546	159,0	144,5	443,0	177,1	280
III-16	828	84,6	77,4	131,3	1 403	144,9	131,2	414,7	312,6	266
IV-16	735	75,4	68,7	107,9	1 322	136,3	123,6	344,6	155,2	230
V-16	840	85,8	78,6	133,3	1 455	150,5	136,1	445,5	232,0	293
VI-16	844	86,7	78,9	146,2	1 458	150,7	136,4	437,9	241,4	381
VII-16	815	83,3	76,2	128,2	1 601	165,2	149,7	504,6	258,2	402
VIII-16	852	86,8	79,7	133,2	1 625	168,0	152,0	528,0	202,1	394
IX-16	838	85,9	78,4	138,1	1 556	161,0	145,5	484,7	286,5	438
X-16	827	83,7	77,4	115,2	1 407	144,4	131,6	380,5	295,5	447
XI-16	830	83,6	77,6	108,5	1 271	129,8	118,8	298,5	355,4	323
XII-16	789	79,5	73,8	99,1	1 539	156,5	143,9	389,7	157,0	414
I-17	618	62,5	57,7	64,6	1 500	153,0	140,3	359,8	155,0	528
II-17	374	37,9	35,0	24,2	1 633	166,1	152,7	338,4	165,2	371
III-17	761	76,3	71,2	84,1	1 570	160,3	146,8	410,0	340,0	351
IV-17	384	38,5	35,9	21,7	1 642	167,5	153,6	377,9	312,8	302
V-17	746	75,0	69,8	85,8	1 517	155,0	141,9	389,9	224,2	347
VI-17	726	72,8	67,9	78,5	1 456	149,3	136,2	360,6	173,8	331
VII-17	770	77,1	72,0	85,0	1 390	142,9	130,0	358,4	203,2	376
VIII-17	824	82,9	77,1	104,1	1 599	163,7	149,5	449,9	211,9	400
IX-17	918	92,6	85,8	137,1	1 616	164,7	151,2	445,0	158,5	403
X-17	829	84,2	77,5	121,4	994	101,6	92,9	231,5	43,7	181
XI-17	821	82,2	76,7	97,5	1 437	146,8	134,4	353,7	112,9	368
XII-17	891	89,3	83,3	117,1	1 712	174,6	160,1	492,9	126,0	415
<b>celkové úspory činných ztrát za dvouleté období</b>									<b>8 629 Kč</b>	
<b>průměrné měsíční úspory</b>									<b>360 Kč</b>	

**Příloha č. 9 - Výpočet přírážky za nedodržení účiníku rozvaděče V118/rVN – k 1**

období	A (MWh)	P <sub>max</sub> (MW)	cosφ (-)	tgφ (-)	u (-)	C <sub>p</sub> (Kč)
I-16	554,0	0,941	0,913	0,448	0,0285	17 323
II-16	403,9	0,975	0,913	0,445	0,0285	13 218
III-16	740,5	1,101	0,903	0,476	0,0285	22 837
IV-16	373,1	1,101	0,908	0,461	0,0285	12 616
V-16	525,5	0,969	0,896	0,496	0,1238	72 056
VI-16	374,7	1,101	0,885	0,526	0,1238	54 990
VII-16	431,5	1,101	0,911	0,453	0,0285	14 241
VIII-16	424,2	0,956	0,913	0,445	0,0285	13 742
IX-16	412,7	0,926	0,912	0,45	0,0285	13 362
X-16	434,8	0,975	0,912	0,449	0,0285	14 076
XI-16	456,2	0,975	0,909	0,459	0,0285	14 673
XII-16	413,0	0,628	0,856	0,603	0,1238	55 444
I-17	394,9	0,561	0,849	0,621	0,1238	52 676
II-17	422,9	0,957	0,84	0,646	0,1238	59 554
III-17	679,1	0,955	0,825	0,685	0,1238	90 494
IV-17	690,1	1,017	0,856	0,603	0,1238	92 369
V-17	709,6	1,03	0,902	0,479	0,0285	21 834
VI-17	710,4	1,101	0,903	0,477	0,0285	21 998
VII-17	810,0	1,166	0,907	0,465	0,0285	24 902
VIII-17	826,2	1,186	0,908	0,462	0,0285	25 393
IX-17	615,3	1,08	0,898	0,49	0,1238	83 893
X-17	310,9	0,747	0,887	0,521	0,1238	44 167
XI-17	472,2	0,779	0,888	0,518	0,1238	63 939
XII-17	539,8	0,782	0,887	0,522	0,1238	72 132
<b>celkové náklady na přírážku při nedodržení účiníku za dvouleté období</b>						<b>971 929 Kč</b>
<b>průměrné měsíční náklady na přírážku při nedodržení účiníku</b>						<b>40 497 Kč</b>

**Příloha č. 10 - Výpočet přírážky za nedodržení účiníku rozvaděče V118/rVN – k 15**

období	A (MWh)	P <sub>max</sub> (MW)	cosφ (-)	tgφ (-)	u (-)	C <sub>p</sub> (Kč)
I-16	603,8	0,837	0,889	0,515	0,1238	80 349
II-16	558,2	0,857	0,886	0,522	0,1238	75 023
III-16	583,0	0,847	0,882	0,535	0,1238	77 935
IV-16	534,3	0,881	0,888	0,518	0,1238	72 336
V-16	544,7	0,833	0,873	0,559	0,1238	73 184
VI-16	548,2	0,843	0,848	0,625	0,1238	73 684
VII-16	660,0	0,969	0,870	0,567	0,1238	88 316
VIII-16	614,6	0,889	0,883	0,531	0,1238	82 121
IX-16	629,0	0,966	0,850	0,621	0,1238	84 532
X-16	539,9	0,885	0,807	0,732	0,1238	73 056
XI-16	561,3	0,856	0,797	0,758	0,2807	170 935
XII-16	285,0	0,454	0,815	0,711	0,1238	38 446
I-17	295,3	0,404	0,824	0,689	0,1238	39 248
II-17	256,5	0,453	0,858	0,600	0,1238	34 990
III-17	300,6	0,473	0,964	0,275	-	0
IV-17	291,9	0,523	0,865	0,579	0,1238	39 886
V-17	292,3	0,400	0,822	0,693	0,1238	38 851
VI-17	272,0	0,746	0,947	0,339	0,0285	9 082
VII-17	270,8	0,840	0,950	0,329	-	0
VIII-17	290,7	0,456	0,940	0,363	0,0285	9 012
IX-17	279,2	0,417	0,899	0,488	0,1238	37 412
X-17	269,2	0,746	0,958	0,300	-	0
XI-17	307,5	0,840	0,917	0,434	0,0285	10 259
XII-17	289,8	0,840	0,943	0,354	0,0285	9 769
<b>celkové náklady na přírážku při nedodržení účiníku za dvouleté období</b>						<b>1 218 426 Kč</b>
<b>průměrné měsíční náklady na přírážku při nedodržení účiníku</b>						<b>50 768 Kč</b>

**Příloha č. 11 - Výpočet přírážky za nedodržení účiníku rozvaděče U210/rVN – k 1**

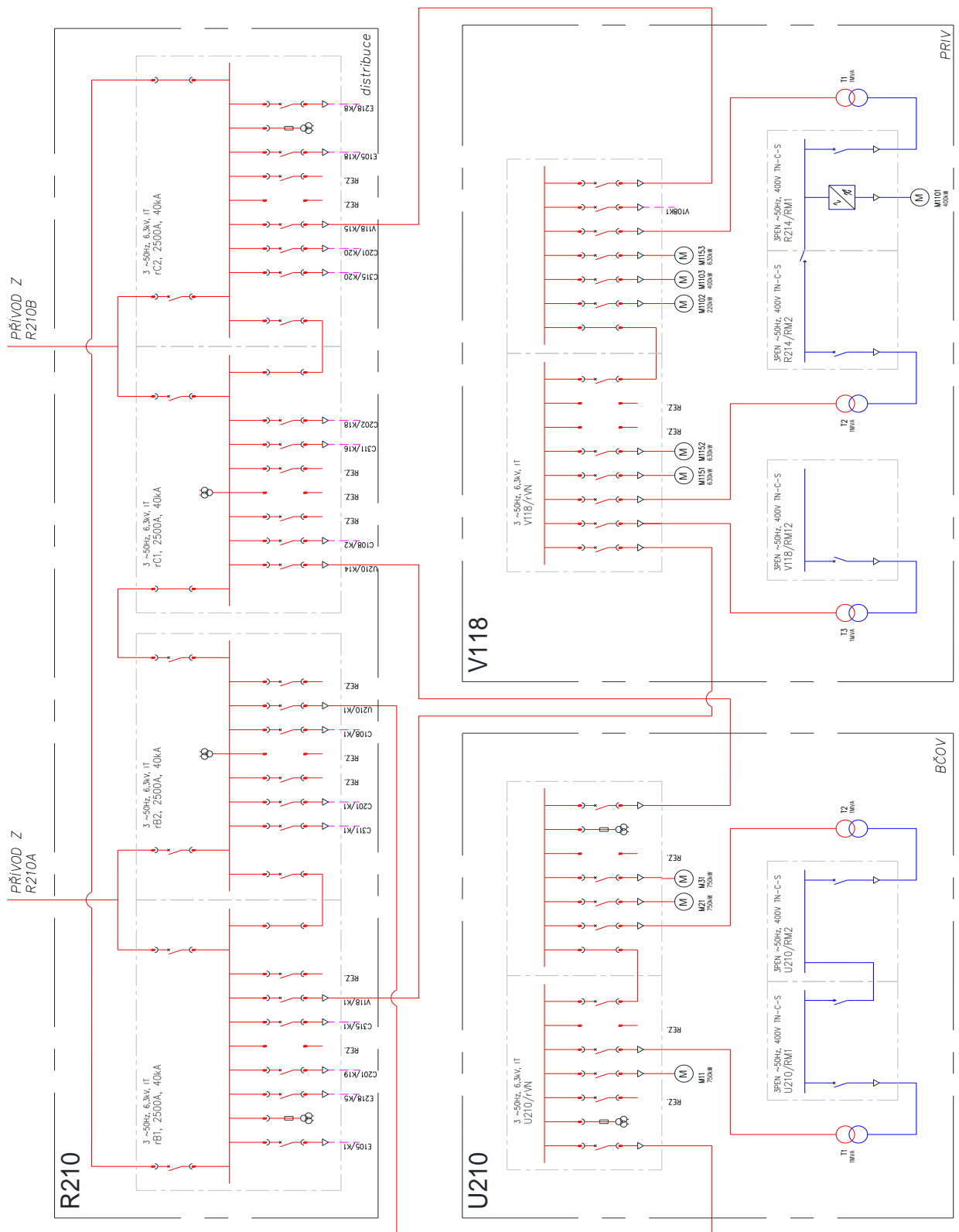
období	A (MWh)	P <sub>max</sub> (MW)	cosφ (-)	tgφ (-)	u (-)	C <sub>p</sub> (Kč)
I-16	646,1	0,930	0,896	0,496	0,1238	86 288
II-16	592,2	0,960	0,895	0,499	0,1238	80 038
III-16	615,9	0,887	0,897	0,494	0,1238	82 258
IV-16	528,9	0,917	0,893	0,503	0,1238	72 008
V-16	625,2	0,893	0,898	0,491	0,1238	83 434
VI-16	607,5	1,660	0,891	0,509	0,1238	88 062
VII-16	606,1	0,914	0,896	0,496	0,1238	81 307
VIII-16	633,7	0,896	0,900	0,485	0,0285	19 450
IX-16	603,5	0,919	0,895	0,499	0,1238	81 041
X-16	615,7	0,948	0,906	0,468	0,0285	19 052
XI-16	597,5	0,938	0,910	0,456	0,0285	18 526
XII-16	586,8	0,922	0,909	0,458	0,0285	18 197
I-17	459,4	0,948	0,905	0,470	0,0285	14 707
II-17	251,3	0,981	0,904	0,474	0,0285	8 983
III-17	566,5	0,936	0,915	0,441	0,0285	17 661
IV-17	276,7	0,954	0,914	0,444	0,0285	9 636
V-17	555,2	0,918	0,911	0,452	0,0285	17 309
VI-17	522,5	0,915	0,913	0,446	0,0285	16 396
VII-17	573,0	0,875	0,916	0,439	0,0285	17 717
VIII-17	613,3	0,890	0,912	0,451	0,0285	18 868
IX-17	660,6	2,561	0,908	0,462	0,0285	23 580
X-17	616,8	2,603	0,902	0,478	0,0285	22 450
XI-17	590,9	0,922	0,915	0,441	0,0285	18 310
XII-17	662,6	0,942	0,914	0,444	0,0285	20 347
<b>celkové náklady na přírážku při nedodržení účiníku za dvouleté období</b>						<b>935 625 Kč</b>
<b>průměrné měsíční náklady na přírážku při nedodržení účiníku</b>						<b>38 984 Kč</b>



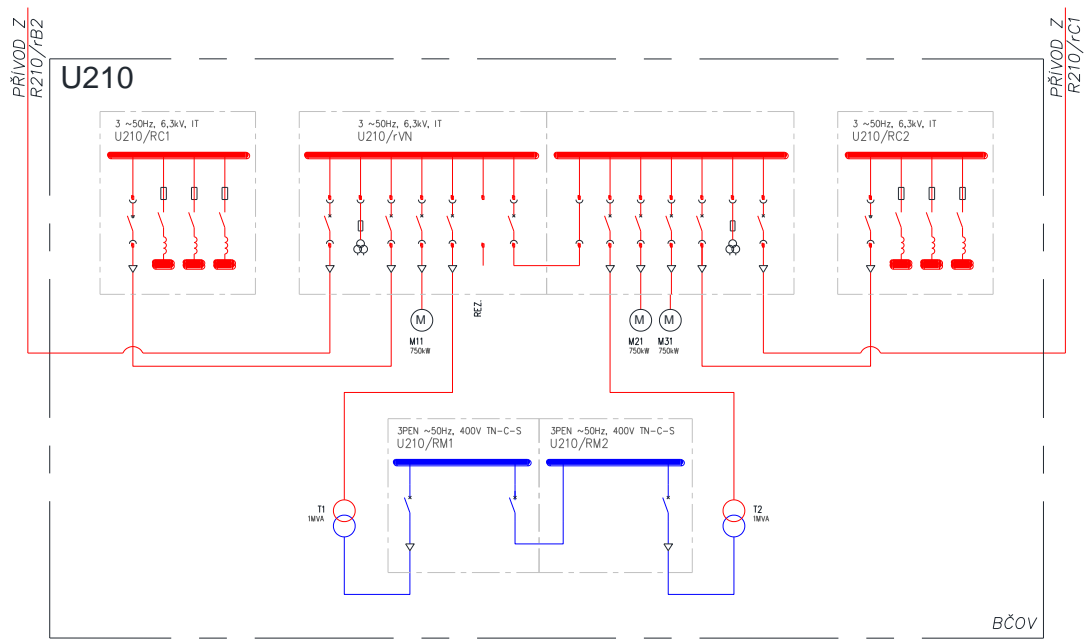
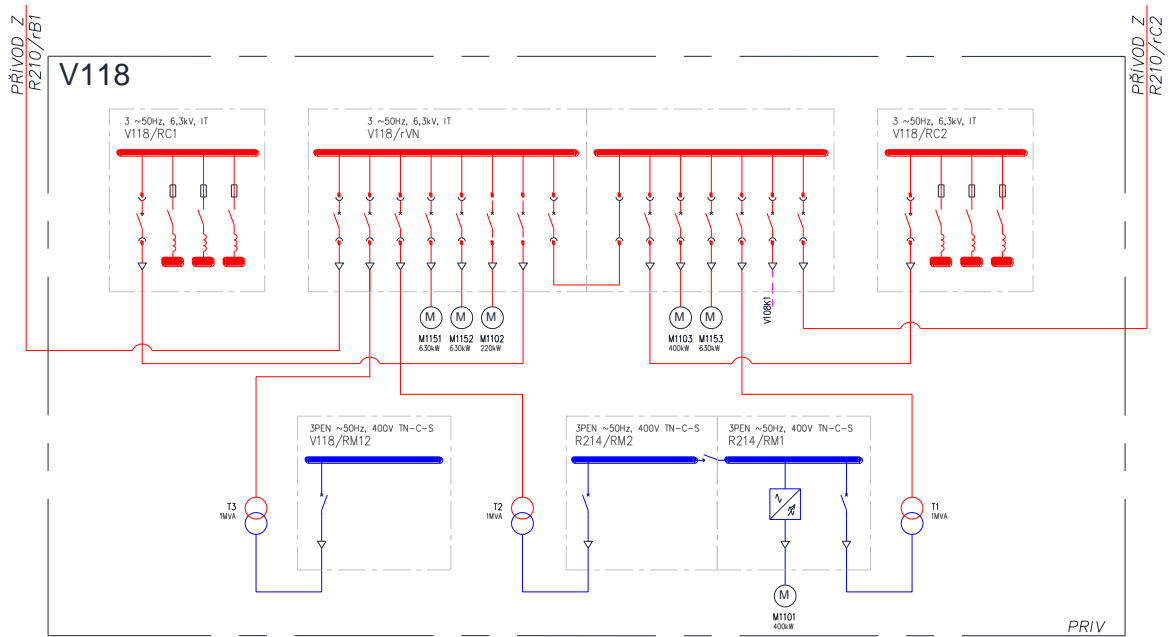
## Příloha č. 12 - Výpočet přírážky za nedodržení účiníku rozvaděče U210/rVN – k 14

období	A (MWh)	P <sub>max</sub> (MW)	cosφ (-)	tgφ (-)	u (-)	C <sub>p</sub> (Kč)
I-16	1089,5	1,837	0,888	0,517	0,1238	147 877
II-16	1075,8	1,812	0,891	0,510	0,1238	145 993
III-16	1043,7	1,716	0,887	0,520	0,1238	141 271
IV-16	951,5	1,761	0,889	0,516	0,1238	130 523
V-16	1082,4	1,811	0,886	0,523	0,1238	146 789
VI-16	1050,0	1,682	0,887	0,521	0,1238	141 734
VII-16	1190,8	1,938	0,888	0,518	0,1238	161 011
VIII-16	1209,2	1,693	0,887	0,522	0,1238	161 071
IX-16	1120,4	1,689	0,886	0,525	0,1238	150 298
X-16	1046,9	1,750	0,893	0,503	0,1238	141 955
XI-16	914,8	1,802	0,897	0,492	0,1238	126 456
XII-16	1145,2	1,817	0,901	0,481	0,0285	35 551
I-17	1116,3	1,832	0,899	0,488	0,1238	151 065
II-17	1097,4	1,827	0,901	0,481	0,0285	34 241
III-17	1168,1	1,771	0,897	0,492	0,1238	156 787
IV-17	1182,5	1,735	0,899	0,489	0,1238	158 206
V-17	1129,0	1,741	0,897	0,493	0,1238	151 796
VI-17	1048,4	1,703	0,894	0,502	0,1238	141 725
VII-17	1034,1	1,689	0,891	0,509	0,1238	139 876
VIII-17	1189,6	1,679	0,895	0,498	0,1238	158 569
IX-17	1163,8	2,597	0,899	0,486	0,1238	163 553
X-17	739,4	1,691	0,896	0,495	0,1238	104 267
XI-17	1034,5	1,761	0,897	0,493	0,1238	140 549
XII-17	1273,6	1,804	0,899	0,488	0,1238	169 825
<b>celkové náklady na přírážku při nedodržení účiníku za dvouleté období</b>						<b>3 300 988 Kč</b>
<b>průměrné měsíční náklady na přírážku při nedodržení účiníku</b>						<b>137 541 Kč</b>

**Příloha č. 13 - Přehledové schéma stávajícího zapojení rozveden**



**Příloha č. 14 - Přehledové schéma varianty 1)**



Příloha č. 15 - Přehledové schéma varianty 2)

