

# **VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

## **KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

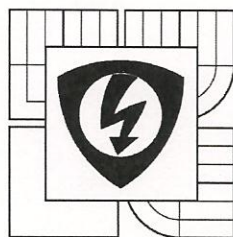
**BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE**

**AUTHOR**

**ONDŘEJ MIŠINGER**

**BRNO 2011**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Ondřej Mišinger  
**Ročník:** 3

**ID:** 115234  
**Akademický rok:** 2010/11

**NÁZEV TÉMATU:**

## Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Úvod do problematiky kompenzace jalového výkonu.
2. Prostředky pro kompenzaci.
3. Příklad výpočtu potřebného kompenzačního výkonu.
4. Návrh kompenzace pro daného průmyslového odběratele.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

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

*předseda oborové rady*



**UPOZORNĚNÍ:**

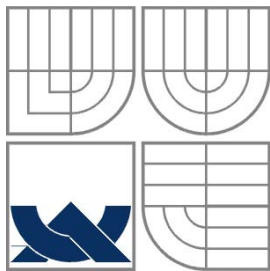
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

MIŠINGER, O. *Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

*Mišinger O.*  
.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

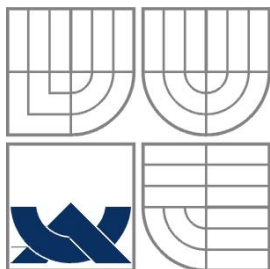
# **Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele**

**Ondřej Mišinger**

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

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



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

**Bachelor's Thesis**

# **The reactive-power compensation of the industrial consumer**

**by**

**Ondřej Mišinger**

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

**Brno University of Technology, 2011**

**Brno**

## ABSTRAKT

Práce se zabývá kompenzací jalového výkonu na hladinách nízkého i vysokého napětí. Teoretická část je zaměřena na vysvětlení základních pojmů kompenzace účinníku a na důvody, proč se kompenzace provádí. Je uvedeno základní rozdělení kompenzace. Pozornost je věnována hlavně hrazené kompenzaci, která je v dnešní době často používána z důvodu velkého množství nelineárních zátěží instalovaných u odběratelů. Uvedeny jsou také základní výpočetní vztahy. Dále jsou popsány základní prvky kompenzačních zařízení, kterými jsou kondenzátory, hradící tlumivky, stykače a regulátory jalového výkonu. V praktické části práce je řešena kompenzace účinníku u konkrétního průmyslového odběratele. Je navrženo více variant technické realizace kompenzačních zařízení. Jednotlivé varianty jsou porovnány z technického i ekonomického hlediska.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Kompenzace jalového výkonu; účinník; hrazená kompenzace; jalový výkon; kompenzační kondenzátory; hradící tlumivky; regulátory jalového výkonu;

## **ABSTRACT**

The work deals with reactive-power compensation (power factor correction = PFC) at low and medium voltage. The theoretical part is focused on explaining the basic concepts of power factor correction and the reasons why the PFC is made. There is stated the basic allocation of PFC. Attention is devoted mainly for detuned PFC, which is nowadays often used because of the large number of nonlinear loads installed by customers. There are listed also the basic computational relations. Moreover, there are described the basic elements of compensation devices, which are capacitors, detuning reactors, contactors and power factor regulators. The practical part is dealt with power factor compensation for a particular industrial customers. There are offered several variants of the technical implementation of the PFC. These various options are compared from both technical and economic terms.

**KEY WORDS:** power factor correction, power factor, detuned power factor correction, reactive power, capacitors for power factor correction, detuned reactors, power factor regulators;

## OBSAH

Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	11
1 Úvod .....	12
2 Základy kompenzace .....	13
2.1 Jalový výkon .....	13
2.2 Úvod do kompenzace a její princip .....	13
2.3 Shrnutí důvodů kompenzace .....	15
2.4 Dodržování odběru se sjednaným účínkem .....	16
3 Základní rozdělení kompenzace .....	18
3.1 Sériová kompenzace .....	18
3.2 Paralelní kompenzace .....	18
4 Kompenzační zařízení .....	20
4.1 Umístění kompenzačních zařízení .....	20
4.1.1 Individuální kompenzace .....	20
4.1.2 Skupinová kompenzace .....	20
4.1.3 Centrální kompenzace .....	21
4.1.4 Smíšená kompenzace .....	21
4.2 Rotační kompenzátory .....	22
4.3 Statické kompenzátory .....	23
4.3.1 Klasická kompenzace .....	23
4.3.1.1 Konstrukce a vlastnosti kompenzačních kondenzátorů NN .....	23
4.3.1.2 Konstrukce a vlastnosti kompenzačních kondenzátorů VN .....	24
4.3.2 Hrazená kompenzace .....	25
4.3.2.1 Deformační výkon a účíník .....	25
4.3.2.2 Princip hrazené kompenzace .....	26
4.3.2.3 Kompenzační tlumivky .....	28
4.3.2.4 Kompenzační filtry .....	29
4.3.2.5 Vliv hrazené kompenzace a filtrů na signál HDO .....	29
5 Řízení kompenzace .....	30
5.1 Regulátory jalového výkonu .....	30



5.2	Způsoby řízení a spínání .....	30
5.2.1	Stupňovité spínání .....	30
5.2.2	Plynulé řízení kompenzačního výkonu .....	32
6	Příklad výpočtu potřebného kompenzačního výkonu .....	33
6.1	Zadání .....	33
6.2	Řešení .....	33
6.2.1	Stav před kompenzací .....	34
6.2.2	Stav po kompenzaci .....	34
6.2.3	Fázorový diagram.....	36
7	Návrh kompenzace pro daného průmyslového odběratele.....	37
7.1	Zadání .....	37
7.2	Rozbor zadání .....	37
7.3	Varianta řešení č. 1 .....	38
7.3.1	Individuální kompenzace motorů M1 a M2.....	38
7.3.2	Hrazený kompenzační rozvaděč na hladině 0,4 kV .....	41
7.3.3	Zhodnocení.....	45
7.4	Varianta řešení č. 2 .....	46
7.4.1	Výpočet kondenzátorů a tlumivek pro stupně 150 a 500 kvar .....	46
7.4.2	Spínací prvky a jistící zařízení pro stupně 150 a 500 kvar.....	48
7.4.3	Zhodnocení.....	50
7.5	Regulace jalového výkonu.....	50
8	Závěr.....	51
	Použitá literatura .....	52

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů .....	13
Obr. 2-2 Trojúhelník výkonů před a po kompenzaci .....	14
Obr. 2-3 Princip kompenzace .....	15
Obr. 2-4 Vliv kompenzace na síť .....	16
Obr. 3-1 Fázorový diagram paralelní kompenzace .....	18
Obr. 3-2 Paralelní kompenzace .....	19
Obr. 4-1 Individuální kompenzace .....	20
Obr. 4-2 Skupinová kompenzace .....	21
Obr. 4-3 Centrální kompenzace .....	21
Obr. 4-4 V-křivky synchronního stroje .....	22
Obr. 4-5 Kompenzační kondenzátory NN.....	23
Obr. 4-6 Kompenzační kondenzátory VN.....	24
Obr. 4-7 Grafické vyjádření vztahů mezi výkony při výskytu vyšších harmonických.....	25
Obr. 4-8 Sériový rezonanční obvod .....	26
Obr. 4-9 Frekvenční charakteristika SRO .....	26
Obr. 4-10 Hrazený kompenzační blok .....	28
Obr. 4-11 Hradící tlumivky NN .....	29
Obr. 5-1 Regulátor jalového výkonu.....	30
Obr. 5-2 Stykač s odporovým spínáním.....	31
Obr. 5-3 Tyristorový modul .....	31
Obr. 5-4 Pasivní plynulé řízení .....	32
Obr. 6-1 Zadání příkladu .....	33
Obr. 6-2 Fázorový diagram příkladu.....	36
Obr. 7-1 Hradící tlumivky VN .....	40
Obr. 7-2 Pojistkový odpínač a nožová pojistka.....	44
Obr. 7-3 Vakuový stykač V7 a pojistky typu CMF .....	49

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Přirážky k platbě za elektřinu při nedodržení účinníku .....	17
Tab. 7-1 Katalogové hodnoty kondenzátorů (individuální kompenzace M1 a M2) .....	39
Tab. 7-2 Vysokonapět'ové pojistkové tavné vložky.....	40
Tab. 7-3 Katalogový list pro výběr tlumivky a výkonu kondenzátoru NN.....	41
Tab. 7-4 Katalogové hodnoty kondenzátorů (kompenzace na hladině NN-stupeň 40 kvar) ..	42
Tab. 7-5 Katalogové hodnoty kondenzátorů (kompenzace na hladině NN-stupeň 20 kvar) ..	42
Tab. 7-6 Katalogové hodnoty stykačů hrazené kompenzace NN .....	43
Tab. 7-7 Jmenovité proudy stykačů při teplotě okolí do 40 °C.....	43
Tab. 7-8 Výběr pojistek podle typu stykačů.....	44
Tab. 7-9 Pojistkové odpínače .....	44
Tab. 7-10 Katalog nožových pojistkových vložek typu PN.....	45
Tab. 7-11 Cenové zhodnocení varianty č.1 .....	45
Tab. 7-12 Katalogové hodnoty kondenzátorů pro stupeň 150 kvar .....	46
Tab. 7-13 Katalogové hodnoty kondenzátorů pro stupeň 500 kvar .....	47
Tab. 7-14 Elektrické parametry vysokonapět'ových stykačů V-Contact .....	49
Tab. 7-15 Cenové zhodnocení varianty č.2.....	50

# 1 ÚVOD

V úvodních kapitolách práce jsou vysvětleny základní pojmy z oblasti kompenzace jalového výkonu, základní rozdělení kompenzace i její principy. Jedna podkapitola se věnuje také samotnému jalovému výkonu, jeho důležitosti ale i problémům spojeným s jeho přenosem. Je shrnuto, kdo a proč má povinnost kompenzovat svůj odběr jalového výkonu, kým je to požadováno a jaké jsou sankce při nedodržování stanovených předpisů.

Další kapitoly se zabývají podrobnějším rozdělením kompenzace a kompenzačních prostředků podle různých kritérií. Zmínka je také o sériové kompenzaci, která však s kompenzací jalového výkonu nesouvisí. Jsou popsány jak dříve používané způsoby kompenzace. Hlavně však způsoby používané v dnešní době. Pozornost je věnována také jednotlivým komponentům používaným v kompenzačních zařízeních. Velký prostor zaujímá hrazená kompenzace. Je také vysvětlena nejednoznačnost pojmu účinník.

V předposlední kapitole je proveden výpočet potřebného kompenzačního výkonu pro dosažení požadovaného účinníku odběru průmyslového závodu. V příkladu jsou provedeny i další výpočty, na kterých je vidět vliv provedené kompenzace na některé parametry sítě. Dále je také vykreslen fázorový diagram.

Nejrozsáhlejší poslední kapitola je věnována praktické části bakalářské práce. Zabývá se návrhem kompenzace pro daného průmyslového odběratele. Byly vytvořeny dvě varianty řešení zadaného problému a jejich zhodnocení.

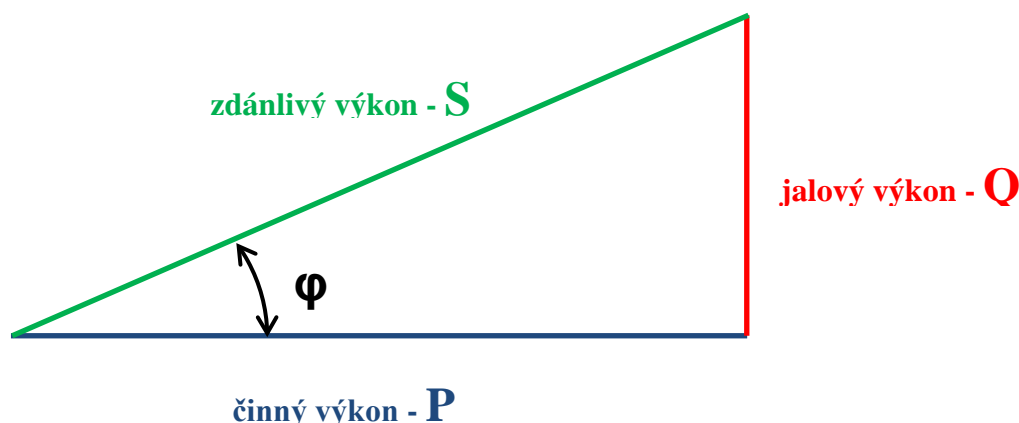
## 2 ZÁKLADY KOMPENZACE

Kapitola vysvětluje základní pojmy kompenzace a představuje tak důležitou úvodní část pro další kapitoly.

### 2.1 Jalový výkon

Jalový výkon  $Q$  je jednou ze složek zdánlivého elektrického výkonu  $S$  spolu s výkonem činným  $P$ . Platí mezi nimi vztah (2.1) vycházející z trojúhelníku výkonů (Obr. 1-1). Jednotkou jalového výkonu je *var*. Někdy se také můžeme setkat s označením jednotky *VAr*. Slovní pojmenování je voltampér reaktanční.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [VA; W, var] \quad (2.1)$$



Obr. 2-1 Trojúhelník výkonů

Činný výkon se mění ve spotřebičích na jiný druh energie. Například na energii mechanickou (otáčení hřídele motoru), tepelnou (ohřívání topné spirály) nebo světelnou (svit žárovky). Jalová složka je rovněž nepostradatelná z toho důvodu, že velká část elektrických spotřebičů potřebuje ke své činnosti vytvořit magnetické pole. Největší část elektrických spotřebičů je induktivního charakteru, protože jejich základem jsou vinutí, tedy indukčnosti. Bez jalové energie by tak nemohly fungovat transformátory, asynchronní motory, zářivková svítidla nebo indukční pece. Vznik elektrického pole, potřebného například k nabíjení kondenzátoru, je rovněž podmíněn existencí jalové energie. Jalový výkon je těmto spotřebičům dodáván ze sítě. Do sítě ho pak spotřebiče i vrací. Z toho vyplývá, že jalový výkon se nespotřebovává. Toto přelévání energie je způsobeno vznikem a zánikem zmíněných polí v průběhu periody.

### 2.2 Úvod do kompenzace a její princip

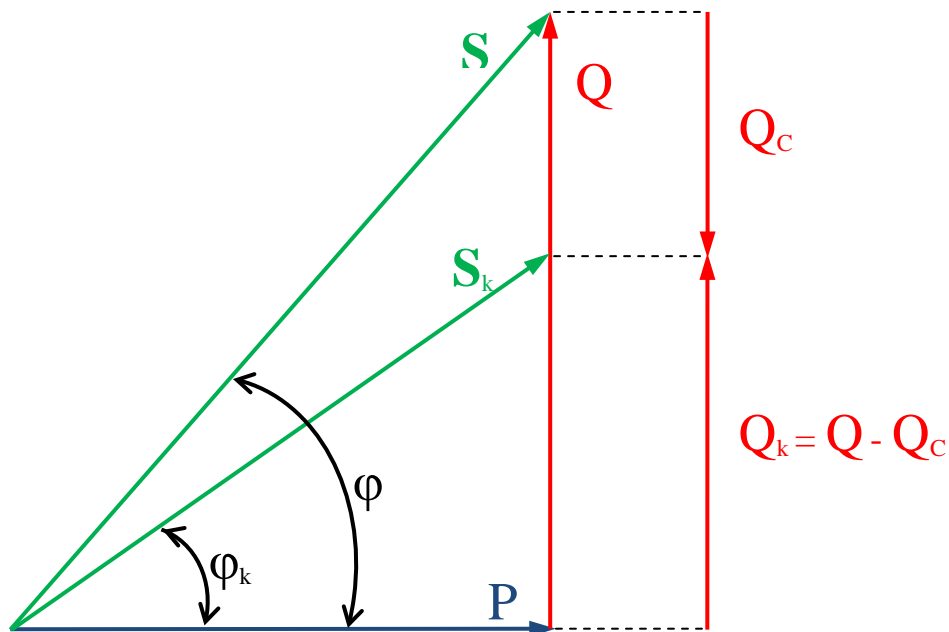
Všemi prvky elektrizační soustavy (transformátory, elektrická vedení, jistící a spínací přístroje atd.) prochází kromě činné složky proudu i složka jalová. Všechna tato zařízení proto

musejí být dimenzována na velikost proudu zdánlivého, jenž je vektorovým součtem jalové a činné složky podle vztahu (2.2).

$$I = \sqrt{I_c^2 + I_j^2} \quad [A] \quad (2.2)$$

S rostoucím proudem se tak zvyšují i pořizovací a provozní náklady, dochází rovněž ke zhoršení technických parametrů těchto zařízení. Chceme-li odebrat stále stejný činný výkon, pak velikost činné složky zdánlivého proudu ovlivnit nemůžeme. Je proto nutné snižovat jalový proud a tím jalový výkon odebíraný ze sítě.

Jak již bylo řečeno, nejvíce spotřebičů elektrické energie je induktivního charakteru. Odebírají tak ze sítě jalový výkon induktivního charakteru. Induktivní jalový výkon  $Q_L$  vzniká na vinutích (indukčnostech), kapacitní  $Q_C$  pak na elektrodách kondenzátoru. Pro snížení odběru jalového výkonu musíme dodat výkon opačného charakteru (fázově posunutý o  $180^\circ$ ) a tím je kapacitní jalový výkon. Je tedy zřejmé, že odebíraný induktivní jalový výkon je možno snížit pomocí kondenzátorů. Ve chvíli kdy cívka odebírá ze sítě induktivní jalový výkon tak kondenzátor naopak do sítě dodává svůj kapacitní jalový výkon a tím se snižuje celkový odběr jalové energie. Protože velikost činného výkonu se nemění, klesá odebíraný zdánlivý výkon a tím i odebíraný proud.

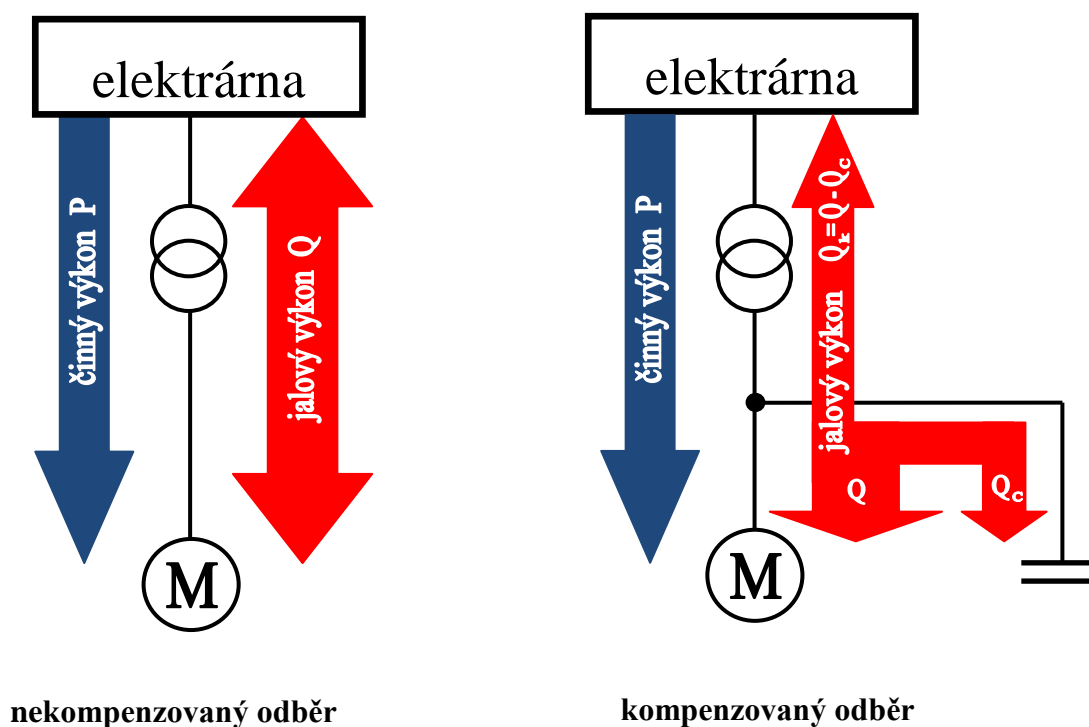


Obr. 2-2 Trojúhelník výkonů před a po kompenzaci

Fázový posun první harmonické napětí oproti procházejícímu zdánlivému proudu je úhel  $\varphi$ . Kosinus tohoto úhlu se nazývá účinník. Účinníkem však může být  $\cos \varphi$  nazýván pouze pokud uvažujeme symetrická sinusová napětí i proudy. Pro vysvětlení základních principů je to dále uvažováno. Pojem účinník je podrobněji vysvětlen v kapitole 4.3.2.1. Z trojúhelníku výkonů na Obr. 2-2 je patrné, že pokud snížíme jalový výkon, zmenší se i velikost úhlu  $\varphi$  a roste jeho kosinus. Účinník tak vypovídá o podílu jalové složky na celkovém zdánlivém výkonu a jeho zvyšování se nazývá kompenzace jalového výkonu nebo kompenzace účinníku.

Na Obr. 2-2 jsou výkony před kompenzací značeny bez indexu, po kompenzaci s indexem  $k$ . Jalový výkon  $Q_C$  je potřebný kompenzační výkon, který je nutno dodat pro zvýšení účinnosti.

Z předchozích odstavců vyplývá, že základním principem kompenzace jalového výkonu je dodávka jalového výkonu přímo ke spotřebiči nebo alespoň co nejbližší. Většina jalového výkonu se po kompenzaci nepřenáší z elektrárny po vedení ke spotřebiči ale pouze z kompenzačního zařízení ke spotřebiči jak ukazuje Obr. 2-3.



Obr. 2-3 Princip kompenzace

## 2.3 Shrnutí důvodů kompenzace

Mezi hlavními přínosy provedené kompenzace účinnosti patří:

- **Snížení pořizovacích nákladů na elektrická zařízení** - Stroje, přístroje i vedení je možno dimenzovat na menší proudy a tím klesá jejich cena.
- **Větší zatížitelnost** - Při větším účinnosti mohou transformátory dodávat vyšší činný výkon a mohou být více využity, dojde k odlehčení vedení i generátorů a tak je možnost jejich většího zatížení.
- **Zlepšení zkratových poměrů v síti**
- **Zmenšení úbytků napětí na vedení** – snížení odebíraného proudu po kompenzaci způsobí menší úbytky oproti nekompenzovanému odběru. Pro úbytek napětí platí vztah (2.3)

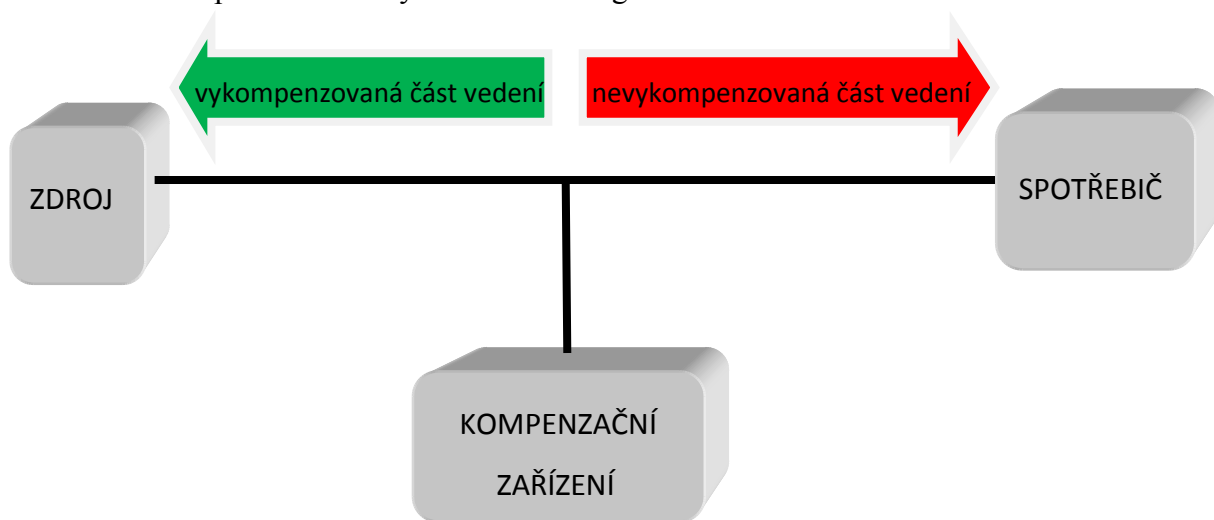
$$\Delta \bar{U} = \bar{Z} \bar{I} \quad [V; \Omega, A] \quad (2.3)$$

- **Zmenšení ztrát výkonu ve vedení** - Na ztrátách se podílejí obě složky zdánlivého proudu, proto po snížení jalového proudu dojde i k poklesu celkového proudu a tím se zmenší ztráty. Pro třífázové vedení potom platí vztah (2.4).

$$\Delta P = 3RI^2 = 3R \cdot (I_c^2 + I_j^2) \quad [W; \Omega, A] \quad (2.4)$$

## 2.4 Dodržování odběru se sjednaným účínkem

Provedená kompenzace se pak projeví jen v napájecí části elektrické sítě a za místem připojení kompenzačního zařízení se nic nemění (viz Obr. 2-4). Kompenzace má tak největší vliv na distribuční síť a zařízení v ní pracující. Právě z tohoto důvodu je sledování účínku odběru důležité pro distributory elektrické energie.



Obr. 2-4 Vliv kompenzace na síť

Nedodrží-li odběratel hodnotu tzv. neutrálního účínku, který je u nás stanoven v rozmezí 0,95 až 1 induktivního charakteru, bude mu distributor elektrické energie účtovat přírážku k platbě za elektrickou energii. Výši přírážek určuje každoročně dokument s názvem cenové rozhodnutí vydávaný energetickým regulačním úřadem (ERÚ). V něm je také popsán způsob měření účínku a výpočet cenové přírážky. Hodnoty procentní přírážky podle účínku odběru jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2-1) [15]. Kontrole účínku jsou podrobeni pouze průmysloví odběratelé, kteří jsou rozděleni do následujících kategorií.

- kategorie A - odběr z distribuční soustavy se sdruženým napětím vyšším než 52 kV
- kategorie B - odběr z distribuční soustavy se sdruženým napětím od 1 kV do 52 kV včetně
- kategorie C - odběr z distribuční soustavy se sdruženým napětím do 1 kV včetně, pokud neslouží k uspokojování osobních potřeb
- kategorie D - stejná jako C, ale elektřina je používána pouze pro potřeby domácnosti (v této kategorii se tedy účinek odběru nehlídá)



Tab. 2-1 Přirážky k platbě za elektřinu při nedodržení účinníku

rozsah tg φ	účinník	přirážka	rozsah tg φ	účinník	přirážka	rozsah tg φ	účinník	přirážka
$tg\varphi = \frac{kVArh}{kWh}$	cos φ	%	$tg\varphi = \frac{kVArh}{kWh}$	cos φ	%	$tg\varphi = \frac{kVArh}{kWh}$	cos φ	%
0,311 - 0,346	0,95	0,00	0,764 - 0,789	0,79	21,32	1,217 - 1,249	0,63	53,47
0,347 - 0,379	0,94	1,12	0,790 - 0,815	0,78	22,94	1,250 - 1,281	0,62	56,03
0,380 - 0,410	0,93	2,26	0,816 - 0,841	0,77	24,61	1,282 - 1,316	0,61	58,67
0,411 - 0,440	0,92	3,43	0,842 - 0,868	0,76	26,32	1,317 - 1,350	0,60	61,40
0,441 - 0,470	0,91	4,63	0,869 - 0,895	0,75	28,07	1,351 - 1,386	0,59	64,23
0,471 - 0,498	0,90	5,85	0,896 - 0,922	0,74	29,87	1,387 - 1,423	0,58	67,15
0,499 - 0,526	0,89	7,10	0,923 - 0,949	0,73	31,72	1,424 - 1,460	0,57	70,18
0,527 - 0,553	0,88	8,37	0,950 - 0,977	0,72	33,63	1,461 - 1,494	0,56	73,31
0,554 - 0,580	0,87	9,68	0,978 - 1,007	0,71	35,58	1,495 - 1,532	0,55	76,56
0,581 - 0,606	0,86	11,02	1,008 - 1,034	0,70	37,59	1,533 - 1,579	0,54	79,92
0,607 - 0,632	0,85	12,38	1,035 - 1,063	0,69	39,66	1,580 - 1,620	0,53	83,42
0,633 - 0,659	0,84	13,79	1,064 - 1,092	0,68	41,80	1,621 - 1,663	0,52	87,05
0,660 - 0,685	0,83	15,22	1,093 - 1,123	0,67	43,99	1,664 - 1,709	0,51	90,82
0,686 - 0,710	0,82	16,69	1,124 - 1,153	0,66	46,25	1,710 - 1,755	0,50	94,70
0,711 - 0,736	0,81	18,19	1,154 - 1,185	0,65	48,58	> 1,755	< 0,5	100
0,737 - 0,763	0,80	19,74	1,186 - 1,216	0,64	50,99			

Odběratel může být rovněž sankcionován za nevyžádanou dodávku jalové energie do distribuční sítě. Tím je myšlen kapacitní jalový výkon dodávaný zpět do sítě. Taková dodávka je způsobena překompenzováním a dle cenového rozhodnutí ERÚ účtuje distributor odběrateli částku 400 Kč za Mvarh.

### 3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KOMPENZACE

V zásadě jsou používány dva základní druhy kompenzace. Ke kompenzaci jalového výkonu však slouží pouze jeden z nich.

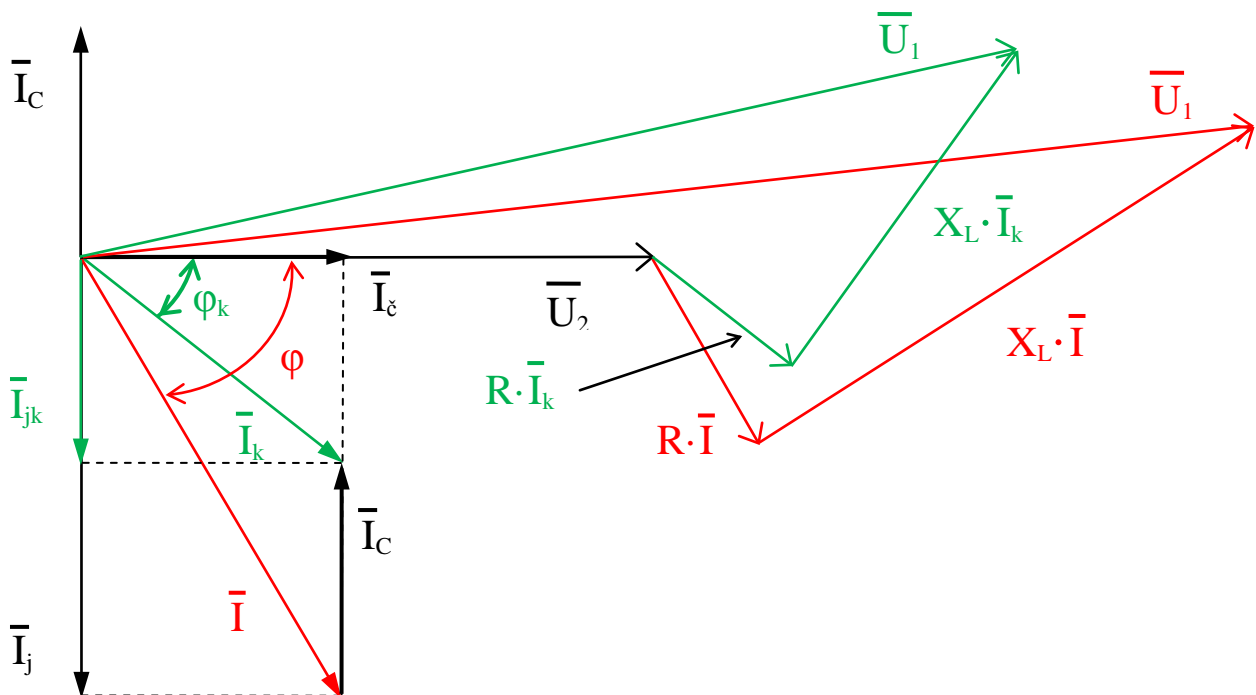
#### 3.1 Sériová kompenzace

Kondenzátor (kompenzační zařízení) je možno zařadit do obvodu sériově nebo paralelně. Sériové zapojení slouží ke změně parametrů rozvodné soustavy. Konkrétně ke změně podélné impedance vedení. Dochází ke zmenšení indukivní reaktance vedení vlivem kapacitní reaktance kondenzátoru. Zmenší se tak úbytky napětí na vedení. Sériovou kompenzací se tato práce dále nezabývá.

#### 3.2 Paralelní kompenzace

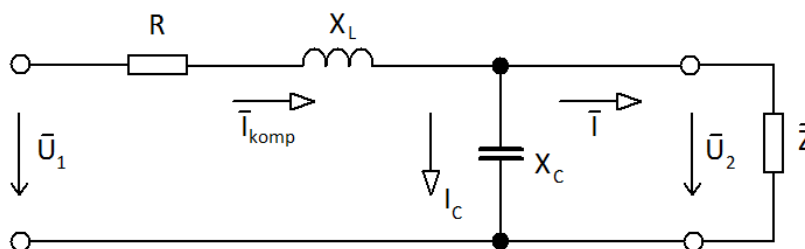
Ke kompenzaci jalového výkonu slouží kompenzační zařízení (nejčastěji kondenzátory) zařazené paralelně ke spotřebiči. Principy popsané v kapitole 2.2 jsou platné právě pro paralelní kompenzaci. Ve fázorovém diagramu na Obr. 3-1 jsou červenou barvou znázorněny veličiny v nekompenzované části vedení (za místem připojení kondenzátoru směrem ke spotřebiči). Červené označení rovněž platí i pro celé vedení, pokud není připojen kondenzátor. Zeleně pak veličiny v kompenzované části (vedení od zdroje ke kondenzátoru). Paralelním zařazením kondenzátoru dojde k poklesu jalové složky odebíraného proudu  $I_j$ , která je induktivního charakteru na  $I_{jk}$  vlivem kapacitního jalového proudu kondenzátoru  $I_C$ . V síti tím poklesne celkový zdánlivý proud z hodnoty  $I$  na  $I_k$  v poměru účinníků před a po kompenzaci podle vztahu (3.1).

$$I_k = I \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k} \quad [A; A, -] \quad (3.1)$$



Obr. 3-1 Fázorový diagram paralelní kompenzace

Zmenšení proudu způsobí snížení úbytků napětí na podélné impedanci vedení a poklesne tak napětí  $U_1$  oproti stavu před kompenzací. Uvažuje se konstantní činný proud a stálé napětí  $U_2$ , což je pouze teoretický předpoklad vhodný k vysvětlení problematiky. K popsanému fázorovému diagramu náleží schéma na Obr. 3-2.



Obr. 3-2 Paralelní kompenzace

Pokud známe činný výkon kompenzovaného zařízení, jeho účinník  $\cos \varphi$  a požadovaný účinník  $\cos \varphi_k$ , můžeme vypočítat potřebný jalový výkon podle vztahu (3.2). Ten je odvozen z trojúhelníku výkonů na Obr. 2-2.

$$Q_C = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \quad [\operatorname{var}; W, -] \quad (3.2)$$

## 4 KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ

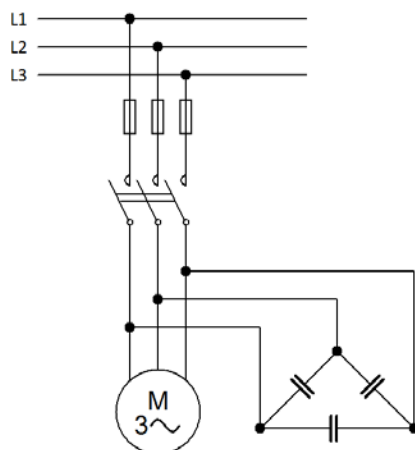
Tato kapitola se zabývá rozdělením a popisem používaných kompenzačních zařízení.

### 4.1 Umístění kompenzačních zařízení

Výběr umístění kompenzačního zařízení je jedním z prvních kroků při návrhu kompenzace. Podkapitola popisuje používané druhy umístění a příklady použití. Uvedené obrázky v této podkapitole jsou pouze principiální a neřeší skutečné zapojení kondenzátorů (trojúhelník, hvězda), jejich spínání ani hrazenou či nehrazenou kompenzaci.

#### 4.1.1 Individuální kompenzace

Individuální neboli jednotlivá kompenzace se vyznačuje tím, že kompenzační zařízení je připojeno přímo na svorky spotřebiče. Tím dojde k odlehčení celého vedení od zdroje až ke spotřebiči a k maximálnímu zmenšení úbytku napětí na přívodním vedení. Tento druh kompenzace je využíván u spotřebičů s velkým výkonem, provozovaných se stálým zatížením po dlouhou dobu. Příkladem mohou být asynchronní motory s výkony řádově desítky až stovky kilowatt, transformátory při chodu naprázdno nebo zářivková svítidla. Kompenzační zařízení se připojuje zapnutím spotřebiče. Individuální kompenzace je nejjednodušší a poměrně spolehlivá. Její nevýhodou je velké množství instalovaných kompenzačních zařízení a z toho plynoucí vyšší pořizovací a provozní náklady ve srovnání se skupinovou kompenzací. Další nevýhodou pak může být to, že využití kompenzačního zařízení závisí na využití spotřebičů. Díky nevyužitým jednotlivě kompenzovaným spotřebičům se tak investice vložená do kompenzace vrací poměrně dlouho.

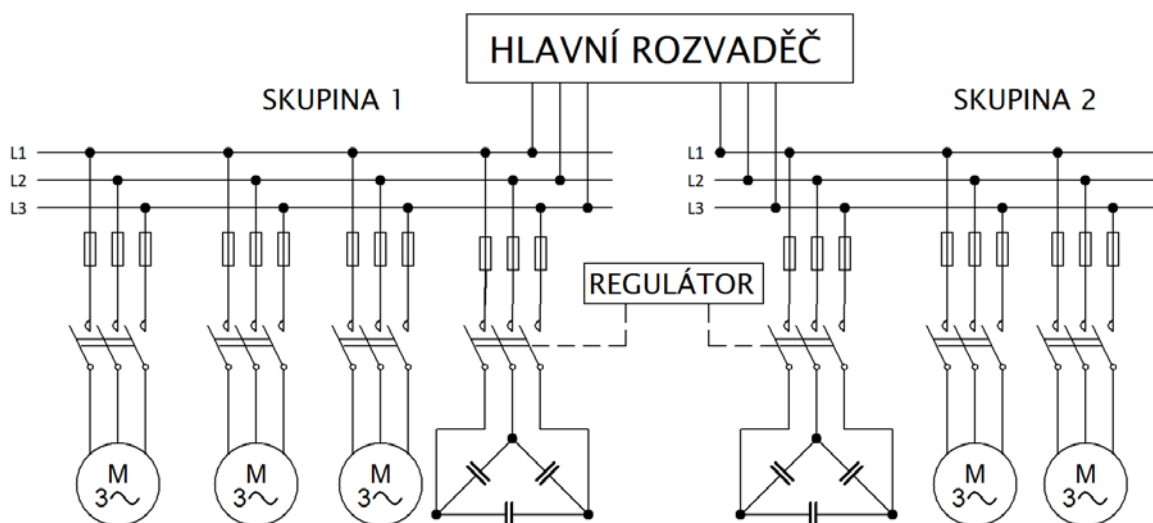


Obr. 4-1 Individuální kompenzace

#### 4.1.2 Skupinová kompenzace

Pokud má určitá skupina spotřebičů společné kompenzační zařízení, jedná se o kompenzaci skupinovou. Může být provedena například v podružných rozvaděčích. Kompenzační zařízení je nutno navrhovat pro soudobý odebíraný výkon. Skupinová kompenzace je vhodná pro spotřebiče, které jsou provozovány krátkodobě nebo přerušovaně. Jejím použitím dojde k úspoře na kompenzačním zařízení (množství kondenzátorů). Zmenší

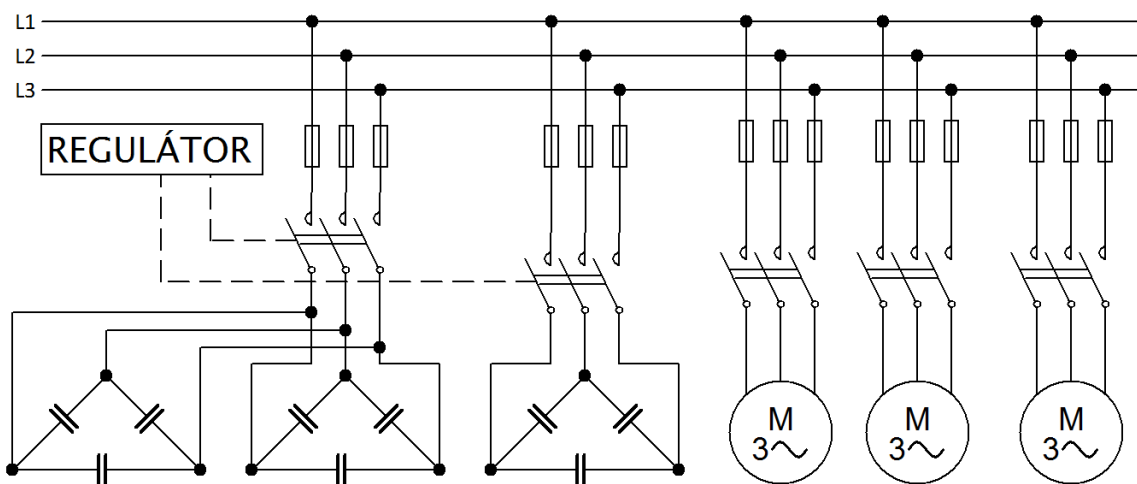
se tím i instalovaný kompenzační výkon oproti kompenzaci individuální. Kompenzační zařízení je nutno připojovat i odpojovat pomocí regulátoru.



Obr. 4-2 Skupinová kompenzace

### 4.1.3 Centrální kompenzace

Častým řešením kompenzace jalového výkonu v průmyslovém podniku je centrální provedení. Kompenzační zařízení může mít podobu většího množství kondenzátorových baterií umístěných v samostatném kompenzačním rozvaděči na vstupu do objektu. Stejně jako u skupinové kompenzace i zde je již nutnost použití automatické regulace dodávaného kompenzačního výkonu.



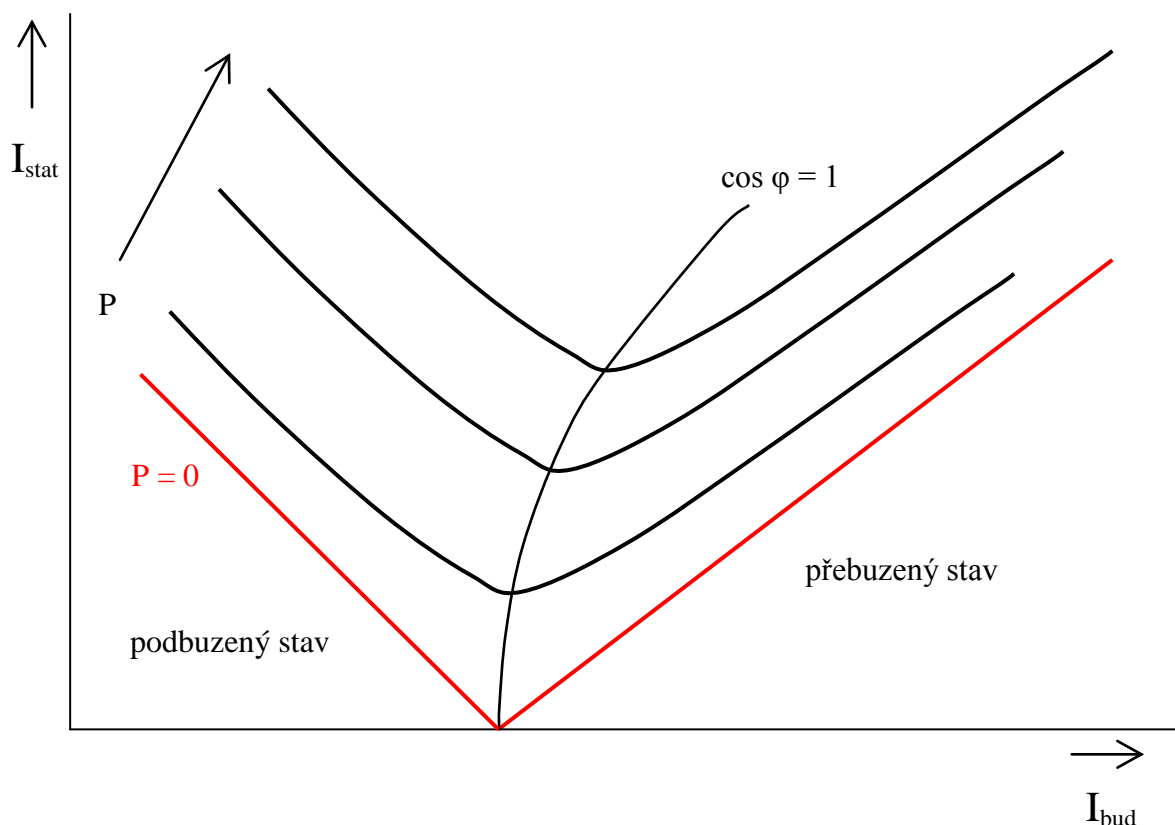
Obr. 4-3 Centrální kompenzace

### 4.1.4 Smíšená kompenzace

Kombinací předchozích typů kompenzací je docíleno smíšené kompenzace. Jedná se o velmi často používané řešení.

## 4.2 Rotační kompenzátory

Ke kompenzaci jalového výkonu lze použít synchronní motor pracující naprázdno. Motor tak neodebírá téměř žádný činný výkon. Na Obr. 4-4 jsou zobrazeny tzv. *v-křivky* synchronního stroje (závislost statorového proudu na proudu budícím), kde pro běh naprázdno platí červená charakteristika. Změnou velikosti budícího proudu lze regulovat dodávku nebo spotřebu jalového výkonu. Při použití synchronního stroje jako kompenzátoru se tak využívá přebuzeného stavu, při kterém motor dodává jalový výkon do paralelně připojené zátěže. Přebuzený stav je v charakteristice vymezen křivkou pro  $\cos \varphi = 1$ .



Obr. 4-4 V-křivky synchronního stroje

Kompenzační výkon dodávaný motorem se vždy mění s určitým zpožděním oproti změně budícího proudu. Může tak docházet k dočasnému překompenzování nebo naopak nedokompenzování. Rotační (synchronní) kompenzátory jsou tak použitelné tam, kde nedochází k častým změnám odběru jalového výkonu a také pro centrální kompenzaci průmyslových sítí. Například u větších podniků připojených na napěťové hladině 6 kV. Velkou nevýhodou synchronních kompenzátorů je nutnost buzení stejnosměrným proudem, čímž dochází k odběru činného výkonu ze sítě. Také pravidelná údržba zvyšuje provozní náklady těchto strojů. Další nevýhodou mohou být velké rozměry synchronních strojů. Rotační kompenzační zařízení z těchto důvodů ztrácejí význam a jsou nahrazovány statickými.

## 4.3 Statické kompenzátory

Za statické kompenzátory jsou považována všechna kompenzační zařízení kromě již zmíněných synchronních strojů. Jedná se buď o jednotlivé kondenzátory, chráněné kompenzační sekce nebo kompenzační filtry.

### 4.3.1 Klasická kompenzace

Pokud hovoříme o klasické kompenzaci, řeč je o samostatně instalovaných kondenzátorech, které nejsou nijak chráněny. Ke kompenzaci jalového výkonu mohou být použity samotné kondenzátory pouze v sítích s minimálním podílem nelineárních zátěží (10 – 15 % instalovaného výkonu). Problematika nelineárních zátěží a vyšších harmonických je v kapitole o hrazené kompenzaci. Kondenzátory jsou nejčastěji provedeny jako třífázové (tři stejné kapacity v jednom pouzdře) v zapojení do trojúhelníka nebo do hvězdy. Kompenzační výkon je dán vztahem (4.1), kde kapacita  $C$  je uvažována jako celková kapacita třífázového kondenzátoru.

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \omega C = U^2 2\pi f C \quad [\text{var}; V, \text{Hz}, F] \quad (4.1)$$

#### 4.3.1.1 Konstrukce a vlastnosti kompenzačních kondenzátorů NN

V dnešní době je pro výrobu nízkonapěťových kompenzačních kondenzátorů nejčastěji používán systém MKP. Svitky jsou tvořeny jednostranně pokoveným polypropylenovým filmem. Jedná se o suchý systém plněný pevnými hmotami rostlinného původu nebo netečnými plyny. Všechny náplně musejí být ekologicky nezávadné. Dielektrický systém MKP je samoregenerační což znamená, že při průrazu dielektrika se pokovená vrstva odpaří. Vznikne pouze malá izolační plocha, která nemá vliv na další funkčnost kondenzátoru. Kompenzační kondenzátory NN různých výkonů jsou na Obr. 4-5 [16].



Obr. 4-5 Kompenzační kondenzátory NN

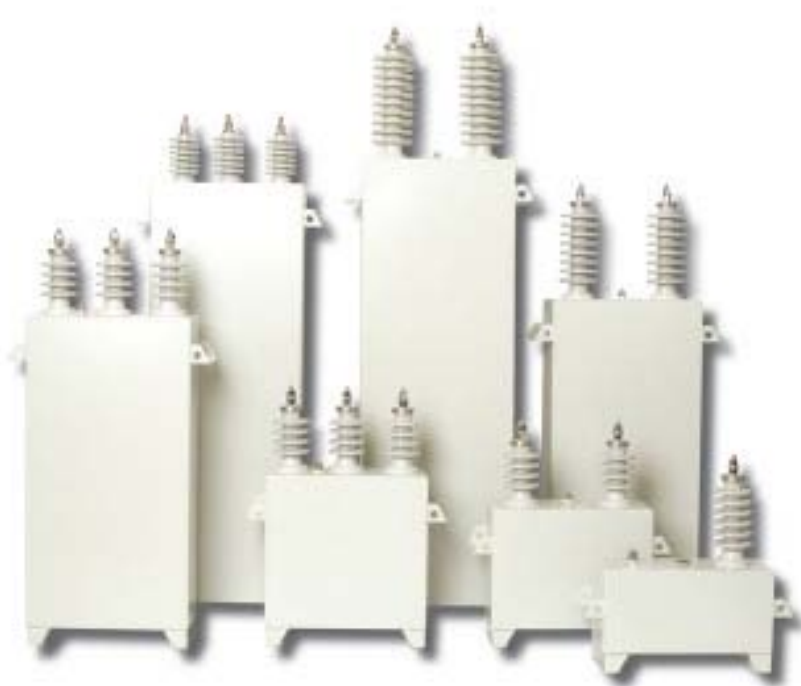
Pro vybití kondenzátoru slouží integrované vybíjecí rezistory. Ty by měly být schopny snížit nebezpečné zbytkové napětí na kondenzátoru minimálně na 75 V během tří minut.

Působením tepelného nebo elektrického přetížení může u kondenzátoru dojít i k explozi. Z tohoto důvodu je v kondenzátoru použita přetlaková pojistka. Zvyšující se tlak v kondenzátoru při jeho namáhání způsobí nadzvedávání víka a dojde tak k mechanickému přetržení přívodů ke svítkům. K jištění kondenzátorů se používají i běžné pojistky podle doporučení výrobce. Nejčastěji to jsou pojistky s pomalými charakteristikami (gG) se jmenovitým proudem rovným alespoň 1,3 násobku jmenovitého proudu kondenzátorů.

Ztráty kondenzátorů se dnes pohybují v desetinách W/kvar i se započítáním ztrát na vybíjecích odporech. V katalogích jsou také uvedeny délky trvání provozu kondenzátorů při vyšším napětí než jmenovitém a násobky jmenovitého proudu, který může trvale kondenzátor snášet. Důležitým ukazatelem jsou rovněž dovolené teploty okolí.

#### **4.3.1.2 Konstrukce a vlastnosti kompenzačních kondenzátorů VN**

Dielektrikem těchto kondenzátorů je polypropylenová fólie impregnovaná ekologicky nezávadnou syntetickou kapalinou. Elektrody tvoří hliníková fólie. Ztráty jsou přibližně stejné jako u kondenzátorů na nízké napětí. Kondenzátory VN jsou konstruovány jako jednofázové nebo třífázové zapojené do hvězdy. Stejně jako kondenzátory NN jsou vybaveny vnitřními vybíjecími rezistory. Doba vybití na stanovených 75 V je až 10 minut. Jejich bezpečný provoz lze rovněž zajistit tlakovým čidlem. Další udávané katalogové hodnoty jsou obdobné jako u kondenzátorů nízkého napětí. Kompenzační kondenzátory VN různých výkonů a počtu fází jsou na Obr. 4-6 [16].



*Obr. 4-6 Kompenzační kondenzátory VN*



### 4.3.2 Hrazená kompenzace

V současné době je používáno mnoho nelineárních spotřebičů tvořených nejčastěji polovodičovými součástkami. Tyto druhy spotřebičů odebírají ze sítě nesinusový proud a tím generují vyšší harmonické zpět do sítě. Dochází tak ke zkreslování napětové křivky samotného provozovatele těchto zařízení, ale i ostatních spotřebitelů připojených do stejné sítě. Výrazně je tak ovlivněna kvalita dodávky elektrické energie. Nelineární spotřebiče mají vliv i na kompenzaci, jak bude popsáno dále.

Mezi nejčastěji se vyskytující nelineární spotřebiče patří:

- rozsáhlé osvětlovací soustavy s nízkotlakými i vysokotlakými zdroji světla s elektronickým nebo indukčním předřadníkem
- elektrotepelné spotřebiče s fázovou regulací výkonu
- střídavé i stejnosměrné regulované pohony
- spínané zdroje
- zařízení využívající elektrický oblouk – svářečky, obloukové peci atd.

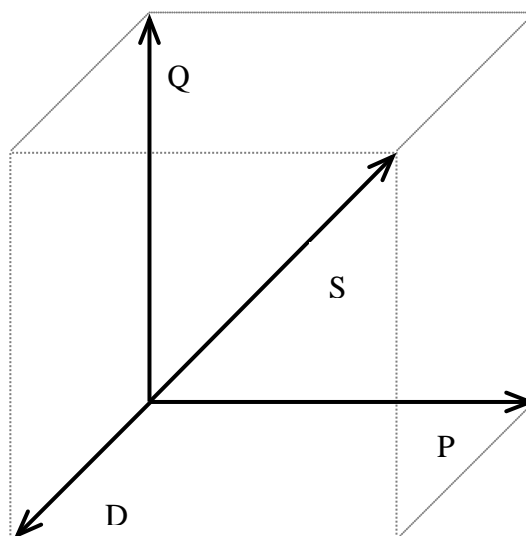
#### 4.3.2.1 Deformační výkon a účinník

Při uvažování vyšších harmonických se zavádí pojem deformační výkon  $D$ , který je tvořen zdánlivým výkonem harmonických složek proudu.

$$D = U \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad [VA; V, A] \quad (4.2)$$

Zdánlivý výkon je potom dán vztahem (4.3) a grafické vyjádření je na Obr. 4-7.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (4.3)$$



Obr. 4-7 Grafické vyjádření vztahů mezi výkony při výskytu vyšších harmonických

Účinník  $\lambda$  (někdy zvaný opravdový účinník) je určen jako podíl činného a zdánlivého výkonu.

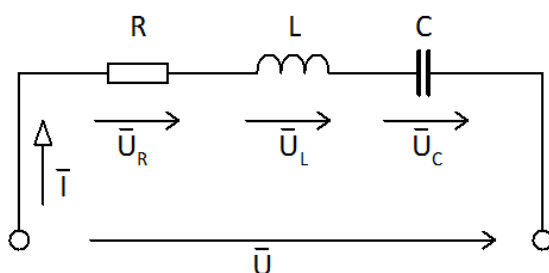
$$\lambda = \frac{P}{S} \quad [-] \quad (4.4)$$

#### 4.3.2.2 Princip hrazení kompenzace

Důsledkem působení vyšších harmonických je zvýšení proudu procházejícího kondenzátorem. Zvyšování proudu je zapříčiněno závislostí reaktance kondenzátoru na frekvenci. Reaktance se zvyšováním frekvence klesá podle vztahu (4.5).

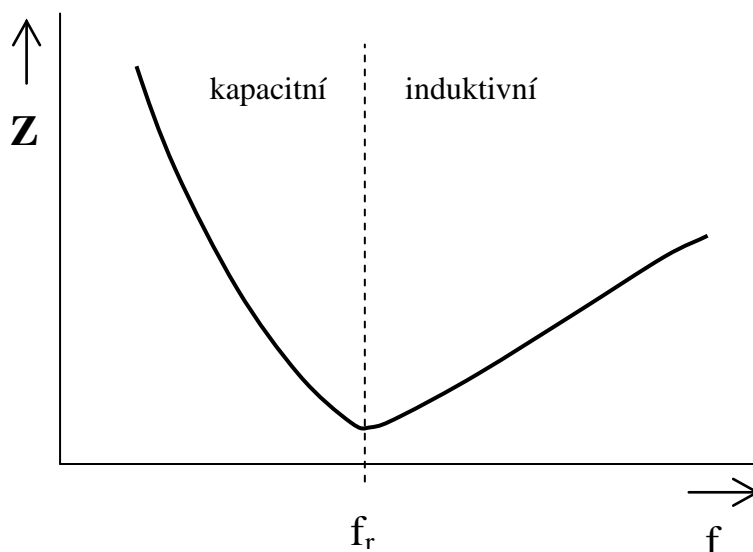
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad [\Omega; Hz, F] \quad (4.5)$$

Procházející proud s vyšší frekvencí proto může snadno překročit jmenovitou hodnotu proudu kondenzátoru. Principem hrazení (chráněné) kompenzace je připojení tlumivky do série ke kompenzačnímu kondenzátoru. Vznikne tak sériový rezonanční obvod (SRO) (Obr. 4-8).



Obr. 4-8 Sériový rezonanční obvod

Jeho frekvenční charakteristika je na Obr. 4-9. Z ní je patrné, že pro frekvence nižší než je rezonanční frekvence  $f_r$  se obvod chová jako kondenzátor. Pro  $f > f_r$  má naopak induktivní charakter.



Obr. 4-9 Frekvenční charakteristika SRO

Rezonanční frekvenci je proto nutné nastavit tak, aby byla menší než frekvence nejmenší harmonické vyskytující se v síti. Pro všechny vyšší harmonické tak bude mít kombinace kondenzátoru a tlumivky induktivní charakter, její impedance poroste s kmitočtem (4.6) a tím se bude snižovat procházející proud. Rezonanční frekvenci lze vypočítat podle Thomsonova vztahu (4.7).

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad [\Omega; Hz, H] \quad (4.6)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [Hz; H, F] \quad (4.7)$$

Pro volbu vhodného kompenzačního článku (kondenzátor + tlumivka) se v praxi používá tzv. činitel zatlumení  $p$ , který je definován jako:

$$p = \frac{1}{n_r^2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.8)$$

Koeficient  $n_r$  je poměr rezonanční a jmenovité frekvence sítě.

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} \quad [-] \quad (4.9)$$

Činitel zatlumení je také definován jako poměr induktivní a kapacitní reaktance (4.10), a z něj jsou potom odvozeny vztahy (4.12), (4.13) a (4.14).

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad [-] \quad (4.10)$$

Pro výpočet reaktance kondenzátoru z katalogových hodnot jmenovitého sdruženého napětí  $U_{Cn}$  a kompenzačního výkonu  $Q_C$  platí vztah vycházející z Ohmova zákona:

$$X_C = \frac{U_{Cn}^2}{Q_C} \quad [\Omega; V, var] \quad (4.11)$$

Pomocí činitele zatlumení se vypočítá reaktance tlumivky podle vztahu:

$$X_L = -pX_C \quad [\Omega; -, \Omega] \quad (4.12)$$

Reaktance celého kompenzačního článku je potom:

$$X_{LC} = (1 - p)X_C \quad [\Omega; -, \Omega] \quad (4.13)$$

Vlivem připojené tlumivky je na kondenzátoru vyšší napětí než síťové. Skutečné napětí na kondenzátoru  $U_C$  tak závisí na jmenovitém napětí sítě  $U_{ns}$  kde je připojen a na činiteli zatlumení  $p$ .

$$U_C = \frac{U_{ns}}{1 - p} \quad [\text{V}; \text{V}, -] \quad (4.14)$$

Kondenzátor tak musí být volen s vyšším jmenovitým napětím než je napětí  $U_C$ .

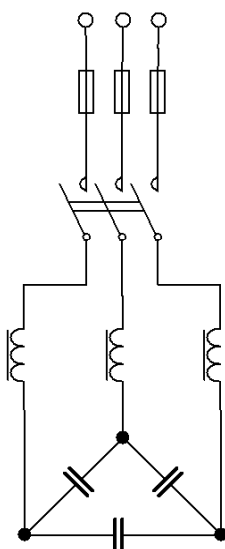
Kompenzační výkon kondenzátoru je udáván při jmenovitém napětí, které již uvažuje činitele zatlumení. Protože kondenzátor je provozován na napětí nižším než jmenovitém, sníží se tím jeho skutečný kompenzační výkon, což vyplývá z upraveného vztahu (4.10) na vztah (4.15)

$$Q_C = \frac{U_C^2}{X_C} \quad [\text{var}; \text{V}, \Omega] \quad (4.15)$$

Instalovaný výkon kondenzátorů tak bude vždy vyšší než potřebný kompenzační výkon.

### 4.3.2.3 Kompenzační tlumivky

Použitím kompenzačních (ochranných, hradících) tlumivek docílíme omezení rezonančních jevů správným naladěním rezonanční frekvence. V praxi nepoužívanější frekvencí je 189 Hz, což odpovídá činiteli zatlumení  $p=7\%$ . Další důležitou funkcí tlumivek v hrazené kompenzaci je omezení amplitudy proudových rázů při spínání a ochrana kondenzátorů před výkonovým přetížením způsobeným účinky harmonických. Zapojení celého kompenzačního bloku (kondenzátor + tlumivka) je na Obr. 4-10.



Obr. 4-10 Hrazený kompenzační blok

Mezi důležité katalogové údaje ochranných tlumivek patří výkon celého kompenzačního bloku, výkon příslušného kondenzátoru a jeho kapacita. Dále pak indukčnost,

jmenovitý proud a proud linearity. Proud linearity je nejčastěji udáván v násobcích jmenovitého proudu (běžně okolo dvounásobku) kdy indukčnost tlumivky ještě neklesne pod 5 % hodnoty jmenovité indukčnosti. Ztráty činného výkonu se pohybují v jednotkách W/kvar instalovaného výkonu. Díky těmto ztrátám jsou tlumivky největším zdrojem tepla v rozvaděči. Tlumivky bývají vybaveny tepelnou ochranou, kdy při překročení nastavené teploty (s ohledem na izolaci) čidlo tlumivku odpojí. Nízkonapěťové hradící tlumivky jsou na Obr. 4-11 [16]. Tlumivky jsou konstruovány jako třífázové na společném jádře. Katalogová hodnota indukčnosti platí pro každou ze tří cívek.



*Obr. 4-11 Hradící tlumivky NN*

#### **4.3.2.4 Kompenzační filtry**

Další využití sériového rezonančního obvodu spočívá v jeho naladění na frekvenci některé z vyšších harmonických. Pro tuto frekvenci má RLC obvod nejnižší impedanci podle Obr 4-9. Tím dochází k tzv. odsávání této harmonické ze sítě. Kompenzační filtry se používají tam, kde už je ovlivnění sítě konkrétními vyššími harmonickými vysoké. Je to tam, kde výkon spotřebičů generujících harmonické proudy výrazně převažuje nad výkonem ostatních spotřebičů. Kompenzační filtr tak plní dvě funkce: kompenzuje jalový výkon (pro frekvence nižší než rezonanční) a filtruje vyšší harmonické (při rezonanční frekvenci). V praxi bývá použito více samostatných obvodů naladěných na různé frekvence harmonických, které chceme eliminovat. Filtrační tlumivky nejsou standardně vyráběny. Musejí proto být navrhovány a vyráběny podle konkrétních požadavků na filtraci.

#### **4.3.2.5 Vliv hrazené kompenzace a filtrů na signál HDO**

Při návrhu kompenzačních filtrů i hrazené kompenzace je nutné brát ohled na signál hromadného dálkového ovládání (HDO). Signál HDO je používán v energetice k řízení odběru elektrické energie (přepínání nízkého a vysokého tarifu, řízení veřejného osvětlení, připojení určitých spotřebičů k síti atd.) a pro jeho přenos je použito silového vedení distribuční sítě. V České republice jsou signály HDO vysílány na frekvencích 183,33 Hz, 216,66 Hz, 283,33 Hz, 760 Hz a 1060 Hz. Nejčastější frekvencí je 216,66 Hz. Používaná frekvence signálu HDO tak nesmí být filtrována (odsávána) nebo jinak potlačena. Rovněž nesmí docházet k rezonanci signálu HDO, která by způsobila nepovolené převýšení signálu a z toho vyplývající problémy v elektrické síti.

## 5 ŘÍZENÍ KOMPENZACE

Jedná se o důležitou součást návrhu kompenzačního zařízení. Kapitola se věnuje regulátorům, řízení a spínání kompenzačních zařízení.

### 5.1 Regulátory jalového výkonu

Regulátory jalového výkonu jsou automatické přístroje sloužící k řízení kompenzace na základě měření proudu a napětí, například pomocí přístrojových transformátorů. Po vyhodnocení naměřených hodnot pak regulátor pomocí svých reléových výstupů ovládá stykače, které připínají a odpínají jednotlivé kompenzační bloky. Tranzistorové výstupy mohou ovládat tyristorové spínací moduly používané jako bezkontaktní spínače. V provozech s převládajícím odběrem kapacitního charakteru mohou být k některým typům regulátorů rovněž připojeny dekompenzační tlumivky.

Dnešní regulátory jsou rovněž schopny sledovat výskyt harmonických složek proudu a vyhodnocovat tak zkreslení i možné poškození kompenzačních zařízení. Takovému poškození dokáže předcházet odepnutím kompenzátorů. Mezi další funkce regulátorů patří například měření provozní teploty v rozvaděči a případné zapínání ventilátoru nebo nastavení více hodnot požadovaného účinníku. Ukázka regulátoru je na Obr. 5-1 [16].



Obr. 5-1 Regulátor jalového výkonu

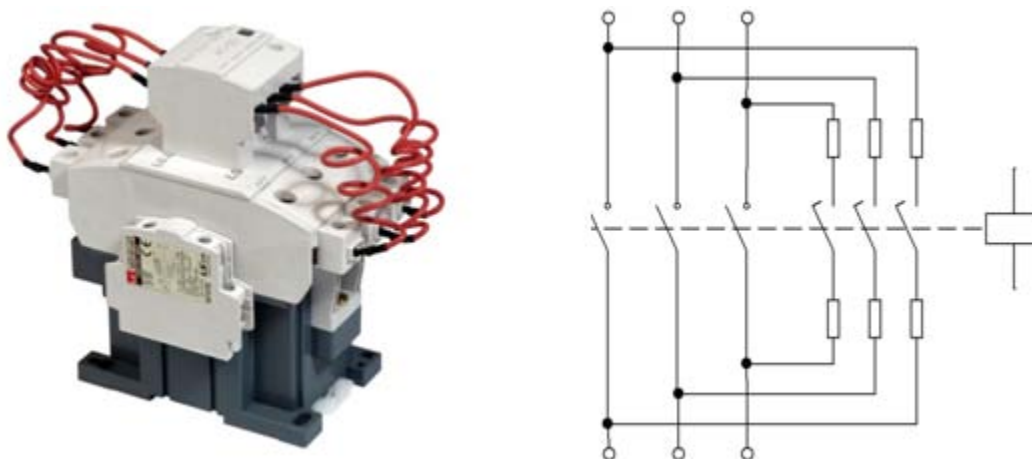
### 5.2 Způsoby řízení a spínání

Kapitola popisuje nejčastěji používané druhy řízení a spínání kompenzačních zařízení a možnosti jejich použití.

#### 5.2.1 Stupňovité spínání

Při stupňovitém spínání je kompenzační výkon rozdělen do jednotlivých bloků, které jsou podle aktuální potřeby připojovány a odpojovány. Stupňovité spínání je možno dále rozdělit na kontaktní a bezkontaktní.

Připnutí kondenzátoru k síti nebo připnutí paralelně k již nabitým kondenzátorům způsobí přechodný děj. Vysoká amplituda kmitavého průběhu přechodného děje (až 100 násobek jmenovitého proudu kondenzátoru) znemožňuje použití klasických stykačů. Pro spínání samostatně instalovaných kondenzátorů (nehrazená kompenzace) jsou proto používány stykače s tzv. odporovým spínáním. Jejich funkce spočívá v zařazení rezistoru do série s kondenzátorem na prvních pár milisekund přechodného děje, kdy je amplituda kmitů nejvyšší. Tím je docíleno snížení amplitudy nabíjecího proudu kondenzátoru. Teprve po zmíněné době jsou kontakty s rezistory překlenuty hlavními kontakty. Stykač s odporovým spínáním a uspořádání jeho kontaktů je na Obr. 5-2 [16]. U hrazené kompenzace je amplituda přechodného děje omezována předřazenou tlumivkou a ke spínání je tak možno používat klasické stykače.



*Obr. 5-2 Stykač s odporovým spínáním*

K bezkontaktnímu stupňovitému spínání jsou nejčastěji použity tyristorové moduly. Spínání je řízeno regulátorem tak, aby byl přechodný děj omezen na minimum. Jedná se o rychlejší způsob spínání než u stykačů. To je vhodné v aplikacích kde se rychle mění odebíraný výkon a účinník. Umožňuje také větší počet sepnutí za určitou dobu. Tyristorový modul je na Obr. 5-3 [17].

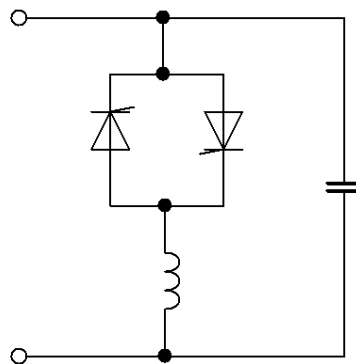


*Obr. 5-3 Tyristorový modul*

### 5.2.2 Plynulé řízení kompenzačního výkonu

V okamžicích kdy je výkon kompenzačního zařízení nadbytečný, dochází k jeho dekompenzaci pomocí fázového řízení proudu tlumivkou. Zvětšení induktivního proudu tekoucí tlumivkou zmenšuje dodávaný kompenzační proud a tím i kompenzační výkon. Takto používaná tlumivka je proto nazývána jako dekompenzační. K fázovému řízení je používáno bezkontaktního spínání pomocí tyristorových modulů. Popsanému způsobu plynulého řízení se říká pasivní. Principiální zapojení pasivního plynulého řízení je na Obr. 5-4.

Pokud se hovoří o aktivním plynulém řízení, jedná se o aktivní filtry. Ty neslouží pouze ke kompenzaci jalového výkonu ale také ke kompenzaci vyšších harmonických složek proudu. Tím omezují negativní ovlivňování sítě nelineárními spotřebiči. Tato problematika už je mimo rozsah práce.



*Obr. 5-4 Pasivní plynulé řízení*

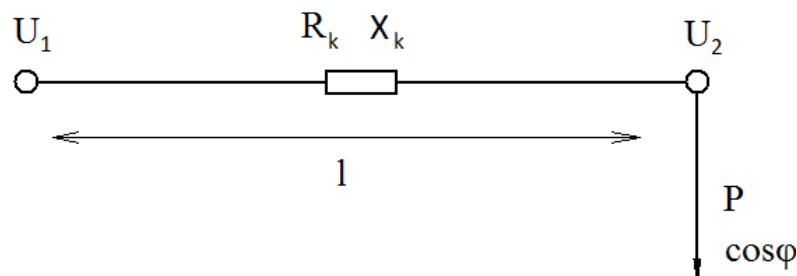


## 6 PŘÍKLAD VÝPOČTU POTŘEBNÉHO KOMPENZAČNÍHO VÝKONU

Na příkladu je ukázáno, jak se změní poměry v síti před a po kompenzaci u průmyslového odběratele. Dále je vypočten potřebný kompenzační výkon k dosažení požadovaného účinníku a vykreslen fázorový diagram.

### 6.1 Zadání

Průmyslový podnik odebírá činný výkon  $1,8 \text{ MW}$  s účinníkem  $\cos\varphi=0,7$ . K rozvodně je připojen vedením délky  $l=2,5 \text{ km}$  s reaktancí  $X_k=0,32 \text{ } \Omega/\text{km}$  a rezistancí  $R_k=0,15 \text{ } \Omega/\text{km}$ . Napětí na výstupu z rozvodny je  $U_1=6 \text{ kV}$ . Navrhněte potřebný kompenzační výkon pro dosažení účinníku  $\cos\varphi_k=0,95$ . Určete ztráty činného výkonu a úbytky napětí na vedení před a po kompenzaci.



Obr. 6-1 Zadání příkladu

### 6.2 Řešení

Výpočet úbytku napětí vychází ze vzorce (6.1)

$$\Delta \bar{U} = \bar{Z} \bar{I} \quad (6.1)$$

Impedance a proud se vyjádří pomocí jejich reálných a imaginárních složek.

$$\Delta U = (R + jX) \cdot (I_{\xi} - jI_j) = RI_{\xi} - jRI_j + jXI_{\xi} + XI_j = (RI_{\xi} + XI_j) + j(XI_{\xi} - RI_j)$$

Při výpočtu zanedbáváme imaginární část úbytku napětí a vzorec se zjednoduší na:

$$\Delta U = RI_{\xi} + XI_j \quad (6.2)$$

Rezistance a reaktance vedení:

$$R = R_k \cdot l = 0,15 \cdot 2,5 = 0,375 \text{ } \Omega$$

$$X = X_k \cdot l = 0,32 \cdot 2,5 = 0,8 \text{ } \Omega$$

## 6.2.1 Stav před kompenzací

Odebíraný jalový výkon před kompenzací:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos \varphi)) = 1,8 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{tg}(\arccos(0,7)) = 1,84 \text{ Mvar}$$

Do vztahu (6.2) se za úbytek napětí dosadí rozdíl fázových napětí na začátku a na konci, proudy se vyjádří pomocí odebíraných výkonů.

$$\frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} = R \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_2} + X \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_2}$$

Nyní se vyjádří napětí na konci vedení  $U_2$  (vstup do podniku)

$$U_2^2 - U_1 U_2 + RP + XQ = 0 \quad (6.3)$$

$$U_2^2 - 6000 \cdot U_2 + 0,375 \cdot 1,8 \cdot 10^6 + 0,8 \cdot 1,84 \cdot 10^6 = 0$$

$$U_2^2 - 6000 \cdot U_2 + 2147000 = 0$$

Jako výsledek připadá v úvahu pouze jeden kořen kvadratické rovnice

$$U_2 = 5,618 \text{ kV}$$

Úbytek napětí před kompenzací

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} = \frac{6000 - 5618}{\sqrt{3}} = 220,5 \text{ V}$$

Odběrový proud

$$|I| = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi} = \frac{1,8 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 5618 \cdot 0,7} = 264,26 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \vec{I} &= |I| \cdot \cos \varphi - j|I| \sin \varphi = |I| \cdot \cos \varphi - j|I| \sin(\arccos(\cos \varphi)) \\ &= 264,22 \cdot 0,7 - j264,22 \cdot \sin(\arccos(0,7)) = (184,98 - j188,72) \text{ A} \end{aligned}$$

Ztráty činného výkonu

$$\Delta P = 3R|I|^2 = 3 \cdot 0,375 \cdot 264,26^2 = 78,56 \text{ kW}$$

## 6.2.2 Stav po kompenzací

Potřebný kompenzační výkon  $Q_C$  se vypočítá podle vztahu (3.2)

$$Q_C = P \cdot (tg\varphi - tg\varphi_k) = P \cdot (tg(\arccos(\cos\varphi)) - tg(\arccos(\cos\varphi_k)))$$

$$= 1,8 \cdot 10^6 \cdot (tg(\arccos(0,7)) - tg(\arccos(0,95))) = \mathbf{1,24 \text{ Mvar}}$$

Odebíraný jalový výkon po kompenzaci  $Q_k$  je:

$$Q_k = Q - Q_C = 1,84 - 1,24 = 0,6 \text{ Mvar}$$

Pro výpočet napětí na  $U_{2k}$  po kompenzaci použijeme již odvozenou rovnici (6.3). Dosadí se jalový výkon po kompenzaci  $Q_k$ , odběr činného výkonu  $P$  se nemění.

$$U_{2k}^2 - U_1 U_{2k} + RP + XQ_k = 0$$

$$U_{2k}^2 - 6000 \cdot U_{2k} + 0,375 \cdot 1,8 \cdot 10^6 + 0,8 \cdot 0,6 \cdot 10^6 = 0$$

$$U_{2k}^2 - 6000 \cdot U_{2k} + 1155000 = 0$$

Jako výsledek připadá v úvahu pouze jeden kořen kvadratické rovnice

$$U_2 = 5,801 \text{ kV}$$

Úbytek napětí před kompenzací

$$\Delta U_k = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3}} = \frac{6000 - 5801}{\sqrt{3}} = \mathbf{115 \text{ V}}$$

Odběrový proud

$$|I| = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{2k} \cdot \cos\varphi_k} = \frac{1,8 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 5801 \cdot 0,95} = 188,58 \text{ A}$$

$$\bar{I} = |I| \cdot \cos\varphi_k - j|I| \sin\varphi_k = |I| \cdot \cos\varphi_k - j|I| \sin(\arccos(\cos\varphi_k))$$

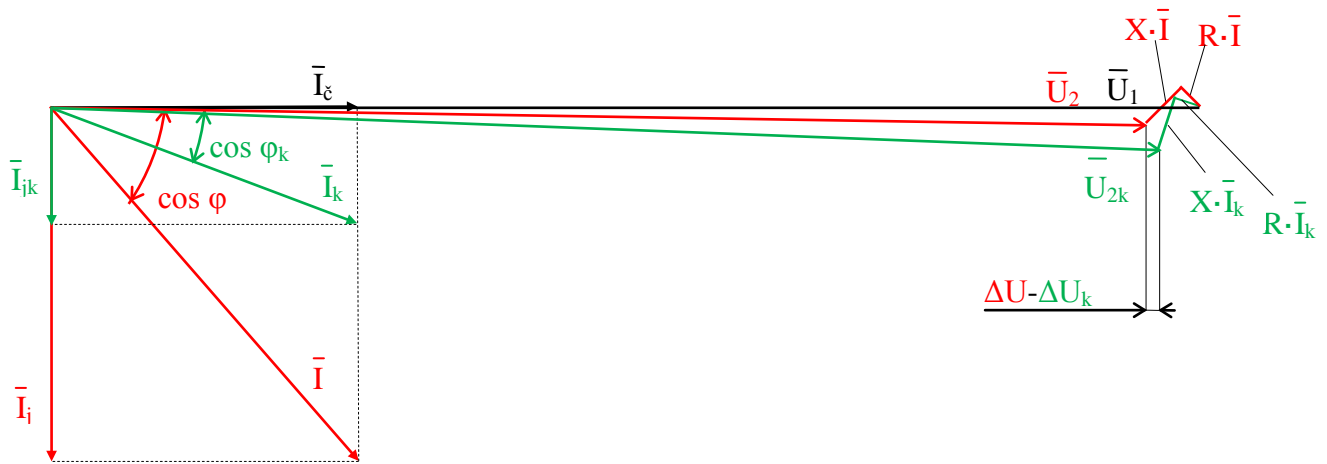
$$= 188,58 \cdot 0,95 - j188,55 \cdot \sin(\arccos(0,95)) = (179,15 - j58,88) \text{ A}$$

Ztráty činného výkonu

$$\Delta P_k = 3R|I|^2 = 3 \cdot 0,375 \cdot 188,58^2 = \mathbf{40,01 \text{ kW}}$$

### 6.2.3 Fázorový diagram

V diagramu je červeně vykreslen nekompenzovaný odběr, zeleně pak kompenzovaný. Napětí rozvodny  $U_1$  a odebíraný činný proud  $I_\varepsilon$  jsou brány jako konstantní. Všechny veličiny jsou fázové. Hodnoty jsou vyneseny v měřítku.  $U_{mm}=25V$   $I_{mm}=5A$



Obr. 6-2 Fázorový diagram příkladu

## 7 NÁVRH KOMPENZACE PRO DANÉHO PRŮMYSLOVÉHO ODBĚRATELE

Praktická část práce se zabývá změnou koncepce kompenzace jalového výkonu v průmyslové síti. Úkolem je navrhnout kompenzační zařízení po provedených změnách v této síti.

### 7.1 Zadání

Původní stav (výkres Původní stav – list 1)

Na čerpací stanici osazené čtyřmi čerpacími agregáty s výkonem 2x 1100 kW a 2x 750 kW, napájených z napěťové hladiny 6 kV, byla řešena kompenzace těchto pohonů jako individuální s pevně připojenými kondenzátory ke svorkám elektromotorů. Viz přehledové schéma. Spotřeba z napěťové hladiny 0,4 kV je vykompenzována stupňovitě spínanými kompenzačními rozvaděči s kompenzačním výkonem 480 kvar.

Nový stav (výkres Nový stav – list 2)

Po provedení rekonstrukce a intenzifikace byly dva čerpací agregáty osazeny střídavými regulovanými pohony se statickými měniči kmitočtu, a na napěťové hladině 0,4 kV doplněny další střídavé regulované pohony. Vlivem instalace těchto pohonů došlo ke značnému zvýšení zkruslení napětí jak na hladině 6 kV tak i na 0,4 kV. Zejména se jedná o 5. a 7. harmonickou (šestipulzní zapojení vstupních usměřovačů použitých měničů). U dvou rekonstruovaných pohonů (750 kW) je nový účinník jejich odběru v rozmezí 0,98 – 0,99. Individuální kompenzace zbývajících elektromotorů (1100 kW) je odpojena z důvodu přetěžování harmonickými, generovanými statickými měniči kmitočtu instalovanými u pohonů 750 kW. Kompenzační rozvaděče na hladině 0,4 kV bylo nutné z důvodů vznikajících rezonančních jevů odstavit, což se projevuje deficitem kompenzačního výkonu cca 350 kvar.

Navrhněte koncepci kompenzace jalového výkonu, která by vedla k eliminaci nebezpečných rezonančních jevů, aby nedocházelo k negativnímu ovlivnění spolehlivosti a bezpečnosti provozu jednak rozvodných zařízení, ale i dalších spotřebičů. Výsledkem práce by měly být alespoň dvě varianty technicko-ekonomického řešení tohoto problému.

### 7.2 Rozbor zadání

Po rekonstrukci čerpací stanice a instalaci měničů kmitočtu musela být stávající kompenzační zařízení odstraněna z důvodů přetěžování harmonickými, což je vysvětleno v kapitole o hrazené kompenzaci. Z toho vyplývá, že nová kompenzace bude jednoznačně hrazená. Základním parametrem nového hrazeného kompenzačního zařízení je činitel zatlumení  $p$ . Instalované měniče kmitočtu jsou zdrojem harmonických proudů, zejména páté a sedmé. Všechny kondenzátorové baterie tak bude nutné zahradit již proti nižší z těchto harmonických, což je harmonická pátého řádu. Této harmonické odpovídá frekvence 250 Hz.

Při ladění rezonanční frekvence (volba činitele zatlumení) je však také nutné brát v potaz frekvenci signálu HDO. Bylo zjištěno, že v oblasti umístění čerpací stanice je

frekvence signálu HDO rovna 216,66 Hz. Rezonanční frekvenci je proto nutné volit nižší než 216,66 Hz s dostatečným odstupem. Vhodnou rezonanční frekvencí tak je  $f_r=189 \text{ Hz}$ , což odpovídá činitele ztlumení  $p=7 \%$ . S tímto činitelem ztlumení bude veškerá kompenzace navrhována.

Všechny kondenzátory musejí být vyměněny za nové. Staré nelze použít z toho důvodu, že nejsou konstruovány na zvýšené napětí způsobené předřazenou tlumivkou.

## 7.3 Varianta řešení č. 1

Prvním návrhem řešení je individuální kompenzace motorů M1 a M2 o výkonech 1100 kW na hladině 6 kV. Na obou hladinách 0,4 kV budou umístěny stejné stupňovitě spínané kompenzační rozvaděče. První variantě náleží výkres s názvem Varianta řešení č.1 – list 3 a rozkreslený kompenzační rozvaděč na listu 5.

### 7.3.1 Individuální kompenzace motorů M1 a M2

Oba motory jsou identické, čímž se návrh zjednoduší. Stačí tedy vypočítat pouze jeden kompenzační článek (kondenzátor + tlumivka). Deficit kompenzačního výkonu  $Q_c$  pro jeden motor je 300 kvar. Při návrhu jsou uvažovány trojfázové kondenzátory českého výrobce ZEZ SILKO v zapojení do hvězdy. Jmenovité napětí kondenzátorů je 6,6 kV. Je používán katalog této firmy Kompenzace jalové energie [16].

Nejdříve vypočteme sdruženou hodnotu skutečného napětí na kondenzátoru  $U_c$ , které bude vyšší než síťové napětí  $U_{ns}$  díky vlivu předřazené tlumivky. Výpočtem podle vztahu (4.14) ověříme, jestli je možno použít kondenzátory o jmenovitém napětí  $U_{cn}$  6,6 kV.

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

Podle výsledku je možno uvedené kondenzátory použít. Pokud bychom však uvažovali horní hranici dovolené odchylky síťového napětí 10 %, tak by už kondenzátory se jmenovitým napětím 6,6 kV nevyhověly.


Fázový proud celého kompenzačního článku se vypočte jako:

$$I = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 28,87 \text{ A}$$

Pomocí proudu a sdruženého napětí na kondenzátoru se vypočte potřebná kapacita jednoho kondenzátoru (kondenzátor v jedné fázi). Z katalogu (Tab. 7-1) se zvolí vhodný třífázový kondenzátor podle parametrů kapacity a proudu.

$$C = \frac{I}{\frac{U_c}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi f} = \frac{28,87}{\frac{6,45 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi \cdot 50} = 24,68 \mu\text{F}$$

Tab. 7-1 Katalogové hodnoty kondenzátorů (individuální kompenzace M1 a M2)

Typ	PDF	Napětí $U^N$ [V]	Výkon $Q^N$ [kvar]	Kapacita $C^N$ [μF]	Proud $I_N$ [A]
CPEFS 23-6,6/200/WF	 4J6251A.pdf	6 600	200,0	3x14,6	3x17,5
CPEFS 23-6,6/250	 4J5935A.pdf	6 600	250,0	3x18,3	3x21,9
CPEFS 23-6,6/300		6 600	300,0	3x21,9	3x26,3
CPEFS 23-6,6/350		6 600	350,0	3x25,6	3x30,7
CPEFS 23-6,6/400		6 600	400,0	3x229,2	3x35,0
CPEFS 23-6,6/450/WF	 4J6814A.pdf	6 600	450	3x32,9	3x39,4
CPEFS 23-6,6/500/WF	 4J6252A.pdf	6 600	500,0	3x36,5	3x43,8

Nejbližší hodnoty kapacity a proudu má kondenzátor se jmenovitým výkonem  $Q_n$  350 kvar. Jeho jmenovitá kapacita  $C_n$  je 3x25,6 μF a jmenovitý proud  $I_n$  3x30,7 A. Nyní se vypočte reaktance zvoleného kondenzátoru  $X_C$  a reaktance předřazené tlumivky  $X_L$  podle vztahu (4.12). Dále pak indukčnost tlumivky  $L$ .

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 25,6 \cdot 10^{-6}} = 124,34 \Omega$$

$$X_L = p \cdot X_C = 0,07 \cdot 124,34 = 8,7 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{8,7}{2\pi \cdot 50} = 27,69 \text{ mH}$$

Kompenzační výkon celého kompenzačního článku  $Q_{LC}$  při použití vybraného kondenzátoru a tlumivky je:

$$Q_{LC} = \frac{U_{ns}^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_n^2}{Q_n}\right)} = \frac{6000^2}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{6600^2}{350 \cdot 10^3}\right)} = 311 \text{ kvar}$$

Celkový kompenzační výkon  $Q_{LC}$  je vyšší než deficit kompenzačního výkonu  $Q_c$ . Odchylka je necelá 4 %, což je zanedbatelná hodnota. Kdybychom požadovali přesnější dodržení velikosti kompenzačního výkonu, musely by být kondenzátory vyrobené také na zakázku podle vypočítaných parametrů. To by však znamenalo značné navýšení ceny oproti sériově vyráběným kondenzátorům.

Hradící tlumivky určené pro hladiny vysokého napětí nejsou sériově vyráběným zbožím. Je proto nutné si tlumivku nechat vyrobit na zakázku podle vypočítaných parametrů indukčnosti  $L$  a proudu  $I_{LC}$  celého kompenzačního článku. Proud kompenzačním článkem bude:

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{311 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 29,93 \text{ A}$$

Návrh magnetického obvodu a způsobu vinutí tlumivky musí být proveden s ohledem na zajištění linearitu indukčnosti v závislosti na proudu v oblasti minimálně 1,2 až 1,5 násobku proudu  $I_{LC}$ . Při nedodržení linearitu při vyšším zatížení hrozí rozladění LC obvodu tvořeného hradící tlumivkou a kompenzačním kondenzátorem. Tlumivky patří mezi nejdražší částí kompenzačního zařízení, proto je důležitá správná volba výrobce. Renomovaným

výrobce v této oblasti je německá firma Hans von Mangoldt, jejíž tlumivky budou použity. Hradící tlumivky na hladiny vysokého napětí jsou na Obr. 7-1. [23]



Obr. 7-1 Hradící tlumivky VN

Kompenzační článek je připojen přímo na svorky motoru. Je připínán právě při zapínání motoru a není tak proto potřeba další spínací zařízení. Nutností však je jistit kompenzační článek proti zkratu. K tomu jsou vhodné pojistky CMF od firmy ABB používané v motorových obvodech. Tyto pojistky mají schopnost snášet opakované proudové nárazy spojené se spouštěním motoru, a hodí se tak i pro časté spínání kompenzačních článků. Jmenovitý proud pojistky při hrazené kompenzaci by měl být alespoň 1,3 až 1,5 násobek jmenovitého proudu článku  $I_{LC}$ . Jmenovitý proud pojistky tedy vychází:

$$I = 1,5 \cdot I_{LC} = 1,5 \cdot 29,93 = 44,9 \text{ A}$$

Z katalogu pojistek omezujících proud typu CEF a CMF firmy ABB (Tab. 7-2) [22] je vybrána pojistka s nejbližším vyšším jmenovitým proudem, tedy 63 A a jmenovitým napětím 7,2 kV.

Tab. 7-2 Vysokonapěťové pojistkové tavné vložky

Typ	Jmenovité napětí kV	Jmenovitý proud A	e	Číslo katalogu	Hmotnost kg
CMF	3,6	100	292	1YMB531028M0001	2.3
CMF	3,6	160	292	1YMB531028M0002	2.3
CMF	3,6	200	292	1YMB531028M0003	2.3
CMF	3,6	250	292	1YMB531028M0004	3.8
CMF	3,6	315	292	1YMB531028M0005	3.8
CMF	7,2	63	442	1YMB531029M0001	3.0
CMF	7,2	100	442	1YMB531029M0002	3.0
CMF	7,2	160	442	1YMB531029M0003	3.0
CMF	7,2	200	442	1YMB531029M0004	5.3
CMF	7,2	250	442	1YMB531029M0005	5.3
CMF	7,2	315	442	1YMB531029M0006	5.3
CMF	12	63	442	1YMB531030M0001	3.0
CMF	12	100	442	1YMB531030M0002	5.3
CMF	12	160	442	1YMB531030M0003	5.3
CMF	12	200	442	1YMB531030M0004	5.3



### 7.3.2 Hrazený kompenzační rozvaděč na hladině 0,4 kV

Při návrhu kompenzace na hladinách nízkého napětí je poměrně značné zjednodušení při výběru kondenzátorů a tlumivek. Jsou totiž většinou vyráběny sériově. Pro výběr tlumivek a jim odpovídajících kondenzátorů je použit katalogový list výrobce ochranných tlumivek NN firmy ELCOM (Tab. 7-3). Parametry tlumivek v katalogovém listě platí pro síťové napětí 400 V, činitel zatlumení je 7 %. Tlumivky jsou určeny pro použití v zapojení s kondenzátory se jmenovitým napětím 440 V. Výkon kondenzátoru je v katalogu značen  $Q_n$ , výkon celého kompenzačního článku je  $Q_k$ , což je ekvivalent k výkonu  $Q_{LC}$  v kapitole 7.3.1. Jmenovitý proud tlumivky  $I_n$  odpovídá proudu celého kompenzačního článku. Podle proudu a výkonu kondenzátoru je vhodný kondenzátor vybrán. Dále je uvedena jmenovitá indukčnost tlumivky  $L_n$ . Ostatní údaje popisují hmotnost a rozměry tlumivky. Malá písmena a, b, c, d, e, f v typovém označení udávají provedení tlumivky (typ vývodu, tepelná ochrana).

Tab. 7-3 Katalogový list pro výběr tlumivky a výkonu kondenzátoru NN

#### Ochranné tlumivky pro kompatibilní kompenzátory účinníku

Typové označení	Objednáací číslo	$Q_n$ [kvar]	$Q_k$ [kvar]	$I_n$ [A]	$L_n$ [mH]	m [kg]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]
EL3L 18.400/440-e/7	BT23305	18,8	16,7	24,2	2,29	12,5			105		75		
EL3L 18.400/440-e/7	BT23306												
EL3L 20.400/440-e/7	TLM035	20	17,8	25,5	2,16	14,5	240		115	90	85		
EL3L 20.400/440-f/7	TLM036												
EL3L 22.400/440-e/7	TLM135	22,5	20,0	28,9	1,92	22,5			118		93		
EL3L 22.400/440-f/7	TLM136												
EL3L 25.400/440-e/7	TLM045	25	22,2	32,1	1,73	23,5	280		115	100	85		
EL3L 25.400/440-f/7	TLM046												
EL3L 28.400/440-e/7	TLM145	28,1	25,0	36,0	1,53	23,5			118		93		
EL3L 28.400/440-f/7	TLM146												
EL3L 40.400/440-a/7	TLM051	40	33,6	51	1,08	28,0	286		127	105	96		
EL3L 40.400/440-b/7	TLM052												
EL3L 40.400/440-c/7	TLM053												
EL3L 40.400/440-d/7	TLM054												
EL3L 40.400/440-e/7	TLM055												
EL3L 40.400/440-f/7	TLM056												
EL3L 45.400/440-a/7	TLM151												
EL3L 45.400/440-b/7	TLM152												
EL3L 45.400/440-c/7	TLM153												
EL3L 45.400/440-d/7	TLM154												
EL3L 45.400/440-e/7	TLM155												
EL3L 45.400/440-f/7	TLM156												
EL3L 50.400/440-a/7	TLM061	50	44,4	63,8	0,86	30,5			127	109	96		
EL3L 50.400/440-b/7	TLM062												
EL3L 50.400/440-c/7	TLM063												
EL3L 50.400/440-d/7	TLM064												
EL3L 50.400/440-e/7	TLM065												
EL3L 50.400/440-f/7	TLM066												

Deficit kompenzačního výkonu je podle zadání 350 kvar. Kompenzační rozvaděč bude stupňovitě spínaný, proto je třeba tento výkon rozdělit na jednotlivé stupně. V praxi většinou předchází volbě stupňů měření, např. pomocí síťových analyzátorů (přehled o diagramu zatížení). Z výsledků měření pak lze určit nejmenší stupeň a stupně další. V tomto příkladu byly všechny parametry zvoleny. Kompenzační rozvaděč bude šestistupňový. Nejmenší spínaný stupeň pak 20 kvar. Je obvyklé, že další stupně jsou voleny jako celočíselné násobky nejmenšího. Další dva stupně budou po 40 kvar a zbývající tři po 80 kvar. Výkon největšího připínaného stupně (v kilovarech), by neměl být větší než 10 % výkonu napájecího transformátoru v jednotkách kVA. Jedná se o poznatek z praxe. Při připnutí většího stupně může docházet například k velkým proudovým špičkám nebo k poklesu napětí. Výkon

transformátoru je 1000 kVA, proto je podmínka splněna. Největší stupeň 80 kvar je tvořen dvěma kompenzačními články 40 kvar, protože tlumivky ani kondenzátory nejsou takto velké běžně vyráběny. Spínané stupně tedy jsou:

$$20 + 40 + 40 + 80 + 80 + 80 = 340 \text{ kvar}$$

Instalovaný výkon tak bude o 10 kvar menší, než je zadaný deficit kompenzačního výkonu. Tato odchylka je však zanedbatelná stejně jako v případě individuální kompenzace motorů v kapitole 7.3.1.

V tabulce 7-3 jsou červeně zvýrazněny vybrané tlumivky a jim odpovídající výkony kondenzátorů. Kondenzátor o výkonu 45 kvar byl nalezen v katalogu ZEZ SILKO [16] (Tab. 7-4). Jmenovitý výkon  $Q_n$  při 440 V je 45 kvar, kapacita  $C_n$  3x247  $\mu\text{F}$  a jmenovitý proud  $I_n$  3x59 A.

Tab. 7-4 Katalogové hodnoty kondenzátorů (kompenzace na hladině NN-stupeň 40 kvar)

Typ	PDF	Zapojení	Napětí $U_N$ [V]	Výkon $Q_N$ [kvar]	Kapacita $C_N$ [ $\mu\text{F}$ ]	Proud $I_N$ [A]	Rozměry [mm]	Hmotnost [kg]	Konstrukce
CSADP 3-0,44/33,3	3J2056A.pdf	3-phase, delta	440	33,3	3x183	3x43,7	$\varnothing$ 136x261/324	3,8	MKP
CSADP 3-0,44/37,5	3J2056A.pdf	3-phase, delta	440	37,5	3x206	3x49,2	$\varnothing$ 136x261/324	3,8	MKP
CSADP 3-0,44/40	3J2056A.pdf	3-phase, delta	440	40	3x219	3x52,5	$\varnothing$ 136x261/324	3,8	MKP
CSADP 3-0,44/45	3J2056A.pdf	3-phase, delta	440	45	3x247,0	3x59,0	$\varnothing$ 136x355/418	5,2	MKP
CSADP 3-0,44/50	3J2056A.pdf	3-phase, delta	440	50	3x274,0	3x65,6	$\varnothing$ 136x355/418	5,2	MKP
CSADP 3-0,44/56	3J2056A.pdf	3-phase, delta	440	56	3x307,0	3x73,5	$\varnothing$ 136x355/418	5,2	MKP

Druhý kondenzátor o výkonu 22,5 kvar výrobce ZEZ SILKO nenabízel. Vhodný kondenzátor byl v nabídce německého výrobce ELECTRONICON. Katalogový list tohoto výrobce (Tab. 7-5). Jmenovitý výkon hledaného kondenzátoru  $Q_n$  při 440 V je 22,5 kvar, kapacita  $C_n$  3x123  $\mu\text{F}$  a jmenovitý proud  $I_n$  je 3x30 A.

Tab. 7-5 Katalogové hodnoty kondenzátorů (kompenzace na hladině NN-stupeň 20 kvar)

$Q_C$ (kvar)	$C_N$ ( $\mu\text{F}$ )	$I_N$ (A)	$I_{max}$ (A)	$D_1 \times H$ (mm)	m (kg)	Design	Bestell-Nr. order no.	Stk./Box pcs./box	Box	Entladeset resistor module ( $< 50\text{V in **s}$ )
440V 50Hz										
15	3 x 82	3 x 20.0	3 x 33.0	85 x 230	1.3	K	275.556-508200	5	FB9	inclusive (45)
16.6	3 x 92	3 x 22.0	3 x 36.0	85 x 230	1.3	K	275.556-509200	5	FB9	inclusive (49)
20	3 x 111	3 x 27.0	3 x 49.5	95 x 230	1.5	L	275.166-511100	3	FB9	275.100-10180 (55)
22.5	3 x 123	3 x 30.0	3 x 45.0	95 x 230	1.5	L	275.166-512300	3	FB9	275.100-10180 (60)
25	3 x 137	3 x 33.0	3 x 56.0	100 x 230	1.7	L	275.176-513700	3	FB9	275.100-10120 (45)
28.2	3 x 154	3 x 37.0	3 x 56.0	116 x 230	2.3	L	275.186-515400	3	FB9	275.100-10120 (50)
30	3 x 166	3 x 40.0	3 x 56.0	116 x 230	2.3	L	275.186-516600	3	FB9	275.100-10120 (55)

Ke spínání jednotlivých stupňů bude použito stykačů rakouské firmy BENEDICT. V její nabídce jsou jak stykače s odporovým spínáním pro nehrazenou kompenzaci, tak stykače určené pro hrazené kompenzace na hladinách NN. V katalogu Capacitor Switching Contactors [18] je možno vybírat stykač podle spínaného výkonu kompenzačního článku. Dalšími parametry pro výběr jsou napětí a jmenovitý proud. Podstatný vliv na velikost

jmenovitého proudu stykače má okolní teplota. V Tab. 7-6 [18] je část z katalogového listu použitého pro výběr stykače.

Jako první bude proveden výběr stykače pro nejmenší stupeň 20 kvar podle Tab. 7-6. Je uvažována hodnota napětí 415 - 440 V a spínaný výkon 22 kvar. Jmenovitý proud stykače  $I_e$  je 28 A. Proud tlumivkou je však 28,9 A a proud kondenzátoru 30 A. Uvažujeme tedy proud kompenzačního článku cca 30 A a vybraný stykač K3-24 proto nevyhoví. Je nutné vybrat stykač s vyšším jmenovitým proudem. Vhodný bude stykač s označením K3-32 se jmenovitým proudem 36 A a spínaným výkonem 27 kvar.

Tab. 7-6 Katalogové hodnoty stykačů hrazené kompenzace NN

## Contactors

Data according to IEC 947-4-1, EN 60947-4-1, VDE 0660

Main Contacts	Type	K3-10	K3-14	K3-18	K3-22	K3-24	K3-32	K3-40	K3-50	K3-62	K3-74	K3-90	K3-115
Utilization category AC6b													
Switching of reactive capacitor banks													
Ambient temperature $\leq 50^\circ\text{C}$													
Rated operational current $I_e$	690V A	8	13	18	20	28	36	42	48	72	108 <sup>1)</sup>	115	144 <sup>2)</sup>
Rated operational power	220-240V kVAr	2,9	5	7	7,5	11	14	16	20	28	33	45	55 <sup>2)</sup>
	380-400V kVAr	5	9	12,5	13	20	25	27,5	33,3	50	75 <sup>1)</sup>	80	100 <sup>2)</sup>
	415-440V kVAr	5,5	9,5	13	14	22	27	30	36	53	75 <sup>1)</sup>	82	103 <sup>2)</sup>
	500V kVAr	6	11	15	17	25	30	36	40	60	75	100	125 <sup>2)</sup>
	525V kVAr	6	11	15	17	25	32	36	43	64	80	105	125 <sup>2)</sup>
660-690V kVAr	8	15	20	22	33	41	48	55	82	120	120	148 <sup>2)</sup>	
1000V kVAr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	160	200 <sup>2)</sup>

Pro stupeň 40 kvar je proud tlumivky 57,7 A a proud kondenzátoru 59 A. Tyto proudy může spínat stykač K3-62 se jmenovitým proudem 72 A a největším spínaným výkonem 53 kvar. Stupně 80 kvar jsou složeny ze dvou článků 40 kvar a budou mít hodnotu proudu dvakrát větší než články 40 kvar. To odpovídá hodnotě až okolo 115 A. Tomuto proudu vyhoví pouze největší stykač v nabídce K3-115. Jmenovitý proud 144 A, spínaný výkon až 103 kvar.

Všechny uvedené proudy jsou uvažovány při teplotě okolí  $50^\circ\text{C}$ . Pro nižší teploty jsou jmenovité proudy stykačů vyšší. Pokud bychom zajistili v rozvaděči teplotu nižší než  $40^\circ\text{C}$ , mohly by se použít stykače nižší řady, jak ukazuje Tab. 7-7. Tím by došlo ke snížení pořizovacích nákladů na stykače. Zajištění nižších teplot než  $40^\circ\text{C}$  by však znamenalo instalaci přídatného chlazení (větráky, výměníky tepla), což by vedlo naopak k nárůstu jak pořizovacích tak provozních nákladů.

Tab. 7-7 Jmenovité proudy stykačů při teplotě okolí do  $40^\circ\text{C}$

## Contactors

Data according to IEC 947-4-1, EN 60947-4-1, VDE 0660

Main Contacts	Type	K3-10	K3-14	K3-18	K3-22	K3-24	K3-32	K3-40	K3-50	K3-62	K3-74	K3-90	K3-115
Rated insulation voltage $U_i$ <sup>1)</sup>	V AC	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	1000	1000
Rated operational current $I_e$ ( $=I_{th}$ ) at $40^\circ\text{C}$ , open 690V	A	25	25	32	32	50	65	80	110	120	130	160	200

Tab. 7-8 Výběr pojistek podle typu stykačů

## Contactors

Data according to IEC 947-4-1, EN 60947-4-1, VDE 0660

Main Contacts	Type	K3-10	K3-14	K3-18	K3-22	K3-24	K3-32	K3-40	K3-50	K3-62	K3-74	K3-90	K3-115
<b>Short circuit protection</b>													
Coordination-type "1" acc. to IEC 947-4-1													
Contact welding without hazard of persons													
fuse size	from	gL (gG) A	35	35	35	35	50	63	80	125	160	160	160
	to	gL (gG) A	63	63	63	63	80	100	160	160	200	200	250

Jištění jednotlivých kompenzačních článků bude provedeno pomocí nožových pojistek umístěných v pojistkových odpínačích. Výběr velikosti pojistky je možný podle hodnot z katalogu stykačů [18]. V Tab. 7-8 jsou uvedeny velikosti a typy pojistek pro jednotlivé stykače. Pro nejmenší stupeň 20 kvar a stykač K3-32 to bude pojistka typu gL nebo gG velikosti 63 A. Stupně 40 kvar se stykači K3-62 budou jištěny pojistkami 125 A. Pro poslední stupeň 80 kvar se stykači K3-115 budou pojistky 160 A.

Podle zjištěných jmenovitých proudů pojistek se vybere vhodný pojistkový odpínač. Ten je vybrán z nabídky českého výrobce jisticích zařízení OEZ. Je možno použít řadové pojistkové odpínače Varius FH000 se jmenovitým proudem do 160 A napětím 690 V. Tyto odpínače mohou být použity pro všechny stupně. Konkrétní typ FH000-3A/T (třípólový pojistkový odpínač) je vybrán z katalogu pojistkových odpínačů OEZ (Tab. 7-9) [19].

Tab. 7-9 Pojistkové odpínače

### Řadové pojistkové odpínače do 160 A

Typ	Kód výrobku	Provedení	Hmotnost [kg]	Balení [ks]
FH000-1A/T	11899	jednopolový, provedení s třimenovými svorkami pro Cu vodič o průřezu 1,5 ÷ 50 mm <sup>2</sup>	0,250	1
FH000-3A/T	12362	třípólový, provedení s třimenovými svorkami pro Cu vodič o průřezu 1,5 ÷ 50 mm <sup>2</sup>	0,620	1

Ze sortimentu OEZ jsou vybrány také vhodné pojistkové vložky podle parametrů zjištěných v předchozích odstavcích (charakteristika pojistek gL nebo gG, jmenovité proudy 63, 125 a 160 A). Pojistkové vložky také musí mít vhodné rozměry podle druhu odpínače. Odpínače řady FH000 jsou určeny pro pojistky velikosti 000. Pojistkové vložky těchto rozměrů jsou pouze v řadě PN. Pojistky jsou proto vybrány z katalogu této řady (Tab. 7-10) [20].



Obr. 7-2 Pojistkový odpínač a nožová pojistka

Tab. 7-10 Katalog nožových pojistkových vložek typu PN

Nožové pojistkové vložky PN										
Velikost	$I_n$ [A]	Charakteristika gG			Charakteristika aM			Hmotnost [kg]	Balení [ks]	
		Typ	Kód výrobku	Ztráty [W]	Typ	Kód výrobku	Ztráty [W]			
000 (00C)	25	PN000 25A gG	07013	2,88	PN000 25A aM	07147	1,4	0,13	3	
	32	PN000 32A gG	07014	2,86	PN000 32A aM	07148	1,8	0,13	3	
	35	PN000 35A gG	07015	3,22	-	-	-	0,13	3	
	40	PN000 40A gG	07016	3,14	PN000 40A aM	07149	2,4	0,13	3	
	50	PN000 50A gG	07017	3,98	PN000 50A aM	07150	3,1	0,13	3	
	63	PN000 63A gG	07018	4,94	PN000 63A aM	35319	2,72	0,13	3	
	80	PN000 80A gG	10419	6,09	PN000 80A aM	35320	3,26	0,13	3	
	100	PN000 100A gG	10420	6,88	PN000 100A aM	35321	4,25	0,16	3	
	125	PN000 125A gG <sup>1)</sup>	13365	7,13	-	-	-	0,16	3	
	160	PN000 160A gG <sup>1)</sup>	13366	9,0	-	-	-	0,16	3	

Vybrané pojistkové vložky tak jsou PN000 63A gG, PN000 125A gG, PN000 160A gG. Pojistkový odpínač s nožovou pojistkou jsou na Obr. 7-2. [19]

### 7.3.3 Zhodnocení

Motory M1 a M2 jsou jedinými kompenzovanými spotřebiči na hladině 6 kV. Jejich individuální kompenzací se tak vyřeší veškerá kompenzace na této napěťové hladině. Individuální kompenzace motorů byla naceněna podle jednotlivých komponentů. V ceně nejsou zahrnuty pouze pojistky.

Kompenzační rozvaděč na hladině 0,4 kV může být proveden jako úplně nový, nebo je možno rekonstruovat rozvaděč starý. Při rekonstrukci je zachováno stávající silové propojení a dispoziční uspořádání. Tím je ušetřena část nákladů oproti novému kompenzačnímu rozvaděči. Nový kompenzační rozvaděč má novou skříň, zabírá méně místa, ale je oproti rekonstruovanému rozvaděči dražší. Cena obou rozvaděčů je odhadnuta firmou zabývající se jejich výrobou. Cena obsahuje všechny navržené komponenty, včetně regulátoru jalového výkonu a skříně. Cenové zhodnocení první varianty je uvedeno v Tab. 7-11.

Tab. 7-11 Cenové zhodnocení varianty č.1

komponent	cena za kus (Kč)	počet kusů	cena celkem (Kč)
Tlumivka / 300 kvar / p=7%	85000	2	170000
Kondenzátor 3f / 350 kvar / 6,6 kV	25000	2	50000
Kompenzační rozvaděč / 340 kvar / 0,4 kV / nový	235000	2	470000
Kompenzační rozvaděč / 340 kvar / 0,4 kV / rekonstruovaný	206000	2	412000
Cena celkem s novým rozvaděčem (Kč)			<b>690000</b>
Cena celkem s rekonstruovaným rozvaděčem (Kč)			<b>632000</b>

## 7.4 Varianta řešení č. 2

Druhá varianta je založena na principu centrální kompenzace. Centrální kompenzační rozvaděč bude na hladině vysokého napětí 6 kV, bude hrazený, stupňovitě spínaný. Schémata pro tuto variantu jsou na výkresech na listech 4 a 6. Pro tuto variantu bude muset být rozvodna čerpací stanice dovybavena dalším vývodem, případně bude využita rezerva. Vývod bude standardně vybaven, stejně jako další vývody v rozvodně. Bude tak obsahovat výkonový vypínač, indikátor napětí, uzemňovač, svodič přepětí a přístrojové transformátory. Celkový deficit kompenzačního výkonu bude součtem všech chybějících kompenzačních výkonů v čerpací stanici. Jedná se o kompenzaci dvou motorů po 300 kvar a kompenzace na hladině nízkého napětí 0,4 kV o výkonu 350 kvar také dvakrát. Celkový deficit kompenzačního výkonu  $Q_C$  tak bude:

$$Q_C = 2 \cdot 300 \text{ kvar} + 2 \cdot 350 \text{ kvar} = 1300 \text{ kvar}$$

Kompenzační rozvaděč bude řešen jako čtyřstupňový s jednotlivými stupni o výkonech dvakrát 150 kvar a dvakrát 500 kvar.

$$150 + 150 + 500 + 500 = 1300 \text{ kvar}$$

### 7.4.1 Výpočet kondenzátorů a tlumivek pro stupeň 150 a 500 kvar

Výpočet bude probíhat obdobně jako u individuální kompenzace vysokonapěťových motorů čerpadel M1 a M2 v kapitole 7.3.1. Nejprve výpočet pro stupeň 150 kvar.





Fázový proud celého kompenzačního článku se vypočte jako:

$$I = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{150 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 14,43 \text{ A}$$

Pomocí proudu a sdruženého napětí na kondenzátoru se vypočte potřebná kapacita jednoho kondenzátoru (kondenzátor v jedné fázi). Z katalogu [16] (Tab. 7-12) se zvolí vhodný třífázový kondenzátor podle parametrů kapacity a proudu.

$$C = \frac{I}{\frac{U_C}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi f} = \frac{14,43}{\frac{6,45 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi \cdot 50} = 12,33 \mu\text{F}$$

Tab. 7-12 Katalogové hodnoty kondenzátorů pro stupeň 150 kvar

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

Nejbližší hodnoty kapacity a proudu má kondenzátor se jmenovitým výkonem  $Q_n$  200 kvar. Jeho jmenovitá kapacita  $C_n$  je 3x14,6 μF a jmenovitý proud  $I_n$  3x17,5 A. Nyní se vypočte

reaktance zvoleného kondenzátoru  $X_C$  a reaktance předřazené tlumivky  $X_L$  podle vztahu (4.12). Dále pak indukčnost tlumivky  $L$ .

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 14,6 \cdot 10^{-6}} = 218,02 \Omega$$

$$X_L = p \cdot X_C = 0,07 \cdot 218,02 = 15,26 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{15,26}{2\pi \cdot 50} = 48,57 \text{ mH}$$

Kompenzační výkon celého kompenzačního článku  $Q_{LC}$  při použití vybraného kondenzátoru a tlumivky.

$$Q_{LC} = \frac{U_{ns}^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_n^2}{Q_n}\right)} = \frac{6000^2}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{6600^2}{200 \cdot 10^3}\right)} = 177,7 \text{ kvar}$$

Celkový kompenzační výkon  $Q_{LC}$  je vyšší než požadovaný výkon kompenzačního stupně 150 kvar. To je opět způsobeno výběrem sériově vyráběného kondenzátoru. Proud celého kompenzačního článku je:

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{177,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 17,1 \text{ A}$$

Dimenzování tlumivky je stejně jako v kapitole 7.3.1 podle indukčnosti a proudu kompenzačního článku s uvažováním linearitu indukčnosti při proudovém přetížení, tzn. alespoň při 1,2 násobku proudu kompenzačního článku.





Opět stejný postup bude pro stupeň 500 kvar. Fázový proud celého kompenzačního článku se vypočte jako:

$$I = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 48,11 \text{ A}$$

Pomocí proudu a sdruženého napětí na kondenzátoru se vypočte potřebná kapacita jednoho kondenzátoru (kondenzátor v jedné fázi). Z katalogu [16] (Tab. 7-13) se zvolí vhodný třífázový kondenzátor podle parametrů kapacity a proudu.

$$C = \frac{I}{\frac{U_C}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi f} = \frac{48,11}{\frac{6,45 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi \cdot 50} = 41,12 \mu\text{F}$$

Tab. 7-13 Katalogové hodnoty kondenzátorů pro stupeň 500 kvar

Typ	PDF	Napětí $U^N$ [V]	Výkon $Q^N$ [kvar]	Kapacita $C^N$ [μF]	Proud $I_N$ [A]
CPEFS 23-6,6/400		6 600	400,0	3x229,2	3x35,0
CPEFS 23-6,6/450/WF	 4J6814A.pdf	6 600	450	3x32,9	3x39,4
CPEFS 23-6,6/500/WF	 4J6252A.pdf	6 600	500,0	3x36,5	3x43,8
CPEFS 23-6,6/550/WF	 4J7443A.pdf	6 600	550,0	3x40,2	3x48,2
CPEFS 23-6,6/600		6 600	600,0	3x43,8	3x52,5
CPEFS 23-6,6/650/WF	 4J5984A.pdf	6 600	650	3x47,5	3x56,9

Vybíráme kondenzátor se jmenovitým výkonem  $Q_n$  550 kvar. Jeho jmenovitá kapacita  $C_n$  je  $3 \times 40,2 \mu\text{F}$  a jmenovitý proud  $I_n$   $3 \times 48,2$  A. Nyní se vypočte reaktance zvoleného kondenzátoru  $X_C$  a reaktance předřazené tlumivky  $X_L$  podle vztahu (4.12). Dále pak indukčnost tlumivky  $L$ .

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 40,2 \cdot 10^{-6}} = 79,18 \Omega$$

$$X_L = p \cdot X_C = 0,07 \cdot 79,18 = 5,54 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{5,54}{2\pi \cdot 50} = 17,63 \text{ mH}$$

Kompenzační výkon celého kompenzačního článku  $Q_{LC}$  při použití vybraného kondenzátoru a tlumivky.

$$Q_{LC} = \frac{U_{ns}^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_n^2}{Q_n}\right)} = \frac{6000^2}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{6600^2}{550 \cdot 10^3}\right)} = 488,8 \text{ kvar}$$

Proud celého kompenzačního článku je:

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} \cdot U_{ns}} = \frac{488,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 47 \text{ A}$$

Dimenzování tlumivky je stejně jako v kapitole 7.3.1 podle indukčnosti a proudu kompenzačního článku s uvažováním linearitu indukčnosti při proudovém přetížení, tzn. alespoň při 1,2 násobku proudu kompenzačního článku.

Kvůli zvoleným kondenzátorům opět vyšel skutečný výkon celého článku jiný, než byla požadovaná hodnota, tentokrát menší. Velikosti jednotlivých stupňů byly zvoleny pouze odhadem, proto odchylky od plánovaných výkonů nejsou příliš podstatné. Celkový kompenzační výkon rozvaděče  $Q_{Ccelk}$  tak bude součtem všech stupňů.

$$Q_{Ccelk} = 177,7 + 177,7 + 488,8 + 488,8 = 1333 \text{ kvar}$$

## 7.4.2 Spínací prvky a jistící zařízení pro stupně 150 a 500 kvar

Pro spínání všech stupňů budou použity vysokonapěťové vakuové stykače V-Contact od firmy ABB, které jsou vyráběny v celé řadě modifikací pro jmenovitá napětí 7 kV (typ V7) a 12 kV (typ V12). Jmenovitý pracovní proud těchto stykačů je až 400 A. Stykače V-Contact jsou určeny pro aplikace v provozech s velkým počtem spínacích cyklů, proto jsou vhodné i k ovládání stupňovitě spínaných kompenzačních zařízení. Stykač bude typu V7, bude v provedení pro pevnou montáž a s příslušenstvím v podobě držáku pojistek. Výběr stykače je proveden z katalogu V-Contact (Tab. 7-14) [21].



Tab. 7-14 Elektrické parametry vysokonapětových stykačů V-Contact

Stykač		V7	V12
Jmenovití napětí	(kV)	7,2	12
Jmenovitý pracovní proud v kategorii AC4	(A)	400	400
Jmenovitá vypínací schopnost	(A)	4000	4000
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud			
- 1 s	(A)	4000	4000
- 30 s	(A)	2500	2500

Pro výběr pojistek je třeba znát proud jednotlivých kompenzačních článků. Při hrazení kompenzaci se doporučuje jistit pojistkami se jmenovitým proudem alespoň 1,3 až 1,5 násobek proudu kompenzačního článku.

Z důvodů popsaných v kapitole 7.3.1 u individuální kompenzace motorů M1 a M2 budou použity motorové pojistky CMF. Proudy pro výběry pojistek budou:

$$I = 1,5 \cdot I_{LC(177,7)} = 1,5 \cdot 17,1 = 26,7 \text{ A}$$

$$I = 1,5 \cdot I_{LC(488,8)} = 1,5 \cdot 47 = 70,5 \text{ A}$$

Z katalogu pojistek omezujících proud typu CEF a CMF firmy ABB (Tab. 7-2) [22] jsou vybrány pojistky s nejbližším vyšším jmenovitým proudem, tedy 63 A pro kompenzační články 177,7 kvar a 100 A pro stupně 488,8 kvar. Držák pojistek u stykače V7 je připraven pro instalaci pojistek s délkou tavné vložky  $e=442$  mm. Tomu vybrané pojistky vyhovují. Vakuový stykač a pojistky jsou na Obr. 7-3. [21]

Proti přetížení jsou kondenzátory chráněny přetlakovou pojistkou, tlumivka pak teplotním čidlem. Pojistky slouží pouze k ochraně proti zkratu. To platí i pro individuální kompenzaci vysokonapětových motorů v kapitole 7.3.1.



Obr. 7-3 Vakuový stykač V7 a pojistky typu CMF

### 7.4.3 Zhodnocení

Centrální kompenzační rozvaděč umístěný na napěťové hladině 6 kV zajišťuje kompenzaci jalového výkonu pro celou čerpací stanici jak na straně vysokého tak i nízkého napětí. Všechny vysokonapěťové komponenty jsou naceněny jednotlivě podle Tab. 7-15.

Tab. 7-15 Cenové zhodnocení varianty č.2

komponent	cena za kus (Kč)	počet kusů	cena celkem (Kč)
Tlumivka / 150 kvar / p=7%	50000	2	100000
Tlumivka / 500 kvar / p=7%	104000	2	208000
Kondenzátor 3f / 200 kvar / 6,6 kV	21000	2	42000
Kondenzátor 3f / 550 kvar / 6,6 kV	31000	2	62000
Stykač V-Contact V7 s pojistkami	82000	4	328000
Cena celkem (Kč)			<b>740000</b>

Není započtena cena skříně rozvaděče a regulátoru, popřípadě také cena spojená s dovybavením dalšího vývodu pro tento rozvaděč na vstupní rozvodně. Pokud k celkové ceně připočítáme ceny těchto komponentů, dostaneme se na cenu okolo 800 000 Kč.

### 7.5 Regulace jalového výkonu

V obou variantách jsou použity stupňovitě spínané kompenzační rozvaděče, proto je nutné spínání jednotlivých sekcí řídit regulátorem jalového výkonu. Princip funkce regulátoru je popsán v kapitole 5.1. Pro obě varianty je možno použít regulátor Redwave. Tento regulátor je vhodný z toho důvodu, že je určen pro regulaci jalového výkonu jak na hladinách nízkého napětí, tak i pro vysoká napětí do 35 kV. Pro vysoká napětí je vyráběn na zakázku, což by byl náš případ při použití ve variantě řešení č.2.

V první variantě řešení bude měřicí transformátor proudu umístěn za napájecím transformátorem 6/0,4 kV. Měření napětí na hladině 0,4 kV může být provedeno mezi fázemi (sdružené napětí) nebo mezi fází a středním vodičem (fázové napětí). Regulátor bude ovládat stykače kompenzačních stupňů K1 až K6, které jsou vidět na schématu kompenzačního rozvaděče 340 kvar na listu 5 v příložených výkresech.

Měření proudu pro potřeby regulátoru ve druhé variantě bude trochu složitější. Rozvodna 6 kV je napájena ze dvou míst, proto je nutné měřit proudy v obou přívodech (přívod 1, přívod 2) a poté je sčítat součtovým transformátorem. Tím je získán celkový odebíraný proud. Měření napětí bude prováděno mezi dvěma fázemi na hladině 6 kV. Regulátor bude ovládat stykače kompenzačních stupňů K1 až K4, které jsou vidět na schématu kompenzačního rozvaděče 1333 kvar na listu 6 v příložených výkresech.

## 8 ZÁVĚR

Kompensace jalového výkonu je a nadále i zůstane aktuální problematikou jak pro většinu průmyslových odběratelů, tak i pro distributory elektrické energie. Ze strany odběratelů se jedná o snížené náklady za elektřinu při dodržení účinníku v žádaných mezích, jak je popsáno v kapitole 2.4. U distributorů jde hlavně o technické problémy vznikající nekompenzovanými odběry a z toho vyplývající ekonomická stránka věci, ať už se jedná o ztráty na vedení nebo špatné využití transformátorů atd. Hlavní důvody kompenzace z pohledu distributorů jsou shrnuty v kapitole 2.3.

V kapitole 6 je vypočítán krátký příklad na kompenzaci jalového výkonu průmyslového odběratele. Vypočtený výkon kompenzačního zařízení je v řádu megavarů. Kondenzátory pro hladinu vysokého napětí jsou vyráběny v rozmezí výkonů od desítek po stovky kvar. Podle požadovaného umístění a typu kompenzace by byly dále voleny velikosti jednotlivých kompenzačních stupňů, druh spínání a řízení kompenzace. V příkladu jsou také vypočteny úbytky napětí na přírodním vedení. Po provedené kompenzaci se úbytek snížil téměř na polovinu proti stavu před kompenzací. Také ztráty na vedení poklesly skoro o 50 %. V poslední části příkladu je vykreslen fázorový diagram z vypočtených hodnot.

Sedmá kapitola se věnuje návrhu kompenzace pro daného průmyslového odběratele. Podle zadání se jedná o změnu koncepce kompenzace na čerpací stanici. Byly navrženy dvě varianty řešení problému kompenzace. Porovnání obou variant je možno provést z technického a ekonomického hlediska. Individuální kompenzace vysokonapětových motorů ve variantě č. 1 zaručuje správné a stálé vykompenzování na požadovanou hodnotu účinníku odběru. Stupňovitě spínaný kompenzační rozvaděč 340 kvar/0,4 V je složen ze šesti stupňů. Jednotlivé stupně byly zvoleny tak, aby bylo možno kombinací jejich spínání dosáhnout dostatečně přesného vykompenzování. Cena první varianty dosahuje téměř 700 000 Kč. Při rekonstrukci stávajících rozvaděčů je o pár desítek tisíc levnější. Varianta č. 2 řeší kompenzaci celého odběrného místa najednou pomocí stupňovitě spínaného centrálního kompenzačního rozvaděče na hladině VN. Všeobecně se na hladinách VN volí menší počet stupňů než na NN z důvodu vysoké ceny vysokonapětových komponentů. Dodávaný kompenzační výkon proto nemůže být tak přesně dávkován. Tím může docházet i k částečnému překompenzování, či nedokompenzování odběru. Cena druhé varianty se pohybuje okolo 800 000 Kč. Z popsaných důvodů se tak jeví jako lepší řešení první varianta.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KORENC, Vladimír, HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi. 1. vydání. Praha: IN-EL, 1999. 123 stran. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] HÁLA, Pavel; LACINA, Břetislav. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. 1. vydání. Brno: Ing. Pavel Hála Elektromanagement, 1994. 90 stran.
- [3] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu : sborník přednášek. 1. vydání. Trutnov: H.V.K.L PROPAG TEAM, 1997. 27 stran.
- [4] TKOTZ, Klaus a kolektiv. Příručka pro elektrotechnika. 2. doplněné vydání. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. 624 stran. ISBN 80-86706-13-3.
- [5] ŽÁČEK, Jaroslav. Účinník v teorii a praxi. Časopis Elektro. 2004, roč. 14, č. 12, s. 4-6. ISSN 1210-0889.
- [6] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi – část 1a. Časopis Elektroinstalatér. 2006, roč. 12, č. 6, s. 4-5. ISSN 1211-2291.
- [7] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi – část 1b. Časopis Elektroinstalatér. 2007, roč. 13, č. 1, s. 8-10. ISSN 1211-2291.
- [8] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi – část 2. Časopis Elektroinstalatér. 2007, roč. 13, č. 2, s. 4-6. ISSN 1211-2291.
- [9] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi – část 3. Časopis Elektroinstalatér. 2007, roč. 13, č. 3, s. 4-6. ISSN 1211-2291.
- [10] HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi – část 4. Časopis Elektroinstalatér. 2007, roč. 13, č. 4, s. 8-10. ISSN 1211-2291.
- [11] BERNÁTH, František. Kompenzácia účinníka v prostredí so zvýšeným výskytom vyšších harmonických. Elektrotechnický magazín. 2010, č. 2, s. 8-9. ISSN 1210-5422.
- [12] KOŠŤÁL, Josef. Kompenzace jalového výkonu na liberalizovaném trhu s elektřinou. Časopis Elektro. 2006, roč. 16, č. 8-9, s. 80-81. ISSN 1210-0889.
- [13] KOŠŤÁL, Josef. Kompenzace jalové elektrické energie. Časopis Elektrotechnika v praxi. 2010, roč. 20, č. 7-8, s. 70-71. ISSN 0862-9730.
- [14] BLAŽEK, Vladimír; SKALA, Petr. Distribuce elektrické energie (skriptum). Brno: Vysoké učení technické. 135 stran.
- [15] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č.7/2009 [online]. 11/2009. Dostupné z: <[http://eru.cz/user\\_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR7\\_2009.pdf](http://eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR7_2009.pdf)>
- [16] ZEZ SILKO. Katalog Kompenzace jalové energie [online]. Dostupné z: <<http://www.zez-silko.cz/PDFs/pfcnew.pdf>>
- [17] KBH ENERGY. Kompenzace jalového výkonu [online]. Dostupné z: <<http://www.kbhenergy.cz/>>

- [18] BENEDICT. Capacitor Switching Contactors [online]. Dostupné z: <[http://www.benedict.at/\\_medialibrary/produkte/Kondensatorschuetze/englisch/Capacitor%20Switch%20D385E.pdf](http://www.benedict.at/_medialibrary/produkte/Kondensatorschuetze/englisch/Capacitor%20Switch%20D385E.pdf)>
- [19] OEZ. Katalog řadových pojistkový odpínačů Varius velikosti 000 do 160 A [online]. Dostupné z: <[http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1291-Z01-10\\_CZ\\_SK.pdf](http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1291-Z01-10_CZ_SK.pdf)>
- [20] OEZ. Katalog pojistkových vložek PN [online]. Dostupné z: <[http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1327-Z01-10\\_CZ\\_SK.pdf](http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1327-Z01-10_CZ_SK.pdf)>
- [21] ABB. Katalog vakuových stykačů V-Contact [online]. Dostupné z: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/fa4b2282dc6e48d9c1256cc3004809d0/\\$file/v-contact%20katalog%20cs%202000.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/fa4b2282dc6e48d9c1256cc3004809d0/$file/v-contact%20katalog%20cs%202000.pdf)>
- [22] ABB. Katalog pojistek omezujících proud typu CEF a CMF [online]. Dostupné z: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/12fb5ee8841c0e0bc125733e00398ef0/\\$file/cef\\_cmf%20katalog%20cs%201vlc000027%20r12006.01.20.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/12fb5ee8841c0e0bc125733e00398ef0/$file/cef_cmf%20katalog%20cs%201vlc000027%20r12006.01.20.pdf)>
- [23] HANS VON MANGOLDT. Reactors for reactive power application [online]. Dostupné z: <[http://www.mangoldt.com/en/pro\\_kom\\_fil\\_msp.php](http://www.mangoldt.com/en/pro_kom_fil_msp.php)>
- [24] OSOBNÍ KONZULTACE VE FIRMĚ ELCOM, a.s. A PROPAGAČNÍ MATERIÁLY TÉTO FIRMY