

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh chráněné kompenzace účiníku

vedoucí práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
autor: Bc. Luboš Cendelín

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš CENDELÍN**
Osobní číslo: **E10N0002K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh chráněné kompenzace účinníku**
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. Uveďte přínosy kompenzace účinníku pro provoz ES a popište druhy kompenzací a srovnajte provozní vlastnosti kompenzačních zařízení.
2. Popište negativní jevy, které mohou doprovázet provoz kompenzačních kondenzátorů v sítích s vyšším podílem nelineární zátěže, a způsoby, kterými lze minimalizovat jejich dopad.
3. Pro konkrétní případ navrhnete chráněnou kompenzační jednotku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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


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

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




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

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá kompenzací jalového výkonu. Popisuje jednotlivé druhy kompenzace a kompenzační zařízení, používaná ke kompenzaci. První část je zaměřena na vysvětlení základních pojmů a principu kompenzace účinníku. Další část je věnována provozu kompenzačních kondenzátorů v sítích s vyšším podílem nelineární zátěže. Jsou zde popsány způsoby minimalizace dopadů negativních vlivů na kondenzátory. Závěrečná část práce se zabývá návrhem rozvaděče chráněné kompenzace pro konkrétní výrobní podnik.

Klíčová slova

Kompenzace jalového výkonu, účinník, jalový výkon, činný výkon, kompenzační zařízení, regulátor, stykač, kompenzační kondenzátor, hradící tlumivka, rozvaděč, hrazená kompenzace, filtr

Abstract

This diploma work deals with a reactive power compensation. It describes individual types of power factor correction and compensation equipment, which are used for power factor correction. First part of the work is focused on basic terms and principle of power factor correction. Next part is dedicated to using of capacitors for power factor correction in network with a higher proportion of non-linear load. There are described ways how to minimize the impacts of harmonics on capacitors. Final part of the work deals with calculation of detuned power factor correction switch-board for a manufacturing company.

Key words

Reactive power compensation, power-factor, reactive power, active power, regulator, contactor, capacitor for power factor correction, detuned reactor, switch-board, detuned power factor correction, filter

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 23/4/2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce paní Doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za vedení při realizaci této práce, za rady a náměty k jejímu zpracování.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Miloslavu Nytrovi za cenné profesionální rady, připomínky a poskytnuté materiály.

Nemalé díky patří také rodičům za jejich trpělivost a všestrannou podporu, kterou mi projevovali během celé doby studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
1. ZÁKLADY KOMPENZACE JALOVÝCH VÝKONŮ	13
1.1 PRINCIP KOMPENZACE ÚČINÍKU	13
1.2 PŘÍNOSY KOMPENZACE ÚČINÍKU	17
1.3 POŽADAVKY NA KOMPENZACI JALOVÉHO VÝKONU U ODBĚRATELŮ	17
2. PARALELNÍ KOMPENZACE JALOVÝCH VÝKONŮ	19
2.1 INDIVIDUÁLNÍ KOMPENZACE	21
2.2 SKUPINOVÁ KOMPENZACE	21
2.3 CENTRÁLNÍ KOMPENZACE.....	22
2.4 KOMBINOVANÁ KOMPENZACE	23
3. DRUHY KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ	24
3.1 ROTAČNÍ SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTORY	24
3.2 STATICKE KOMPENZÁTORY	25
3.2.1 <i>Prostá kompenzace</i>	25
3.2.1.1 <i>Konstrukce kondenzátorů NN.</i>	26
3.2.1.2 <i>Konstrukce kondenzátorů VN.</i>	27
3.2.2 <i>Chráněná (hrazená) kompenzace</i>	28
3.2.3 <i>Kompenzační filtry</i>	29
3.2.4 <i>Aktivní filtry</i>	30
3.2.4.1 <i>Paralelní aktivní filtry</i>	31
3.2.4.2 <i>Sériové aktivní filtry</i>	32
3.2.4.3 <i>Kombinované aktivní filtry</i>	33
4. ZPŮSOBY ŘÍZENÍ KOMPENZACE	33
4.1 REGULÁTORY JALOVÉHO VÝKONU.....	33
4.1.1 <i>Měřicí transformátor proudu</i>	34
4.2 STUPŇOVITÉ SPÍNÁNÍ	35
4.2.1 <i>Kontaktní spínání</i>	36
4.2.2 <i>Bezkontaktní spínání</i>	37
4.3 PLYNULÉ ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU.....	38
4.3.1 <i>Plynule řízené kompenzační filtry</i>	38
4.3.2 <i>Aktivní filtry</i>	40
5. VLIV VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH NA PROVOZ KONDENZÁTORŮ	40
5.1 SÉRIOVÁ REZONANCE	41
5.2 PARALELNÍ REZONANCE	42
5.3 KONDENZÁTOR V SÍTI S VYŠŠÍMI HARMONICKÝMI	43
5.4 CHRÁNĚNÁ (HRAZENÁ) KOMPENZACE	44
5.4.1 <i>Kompenzační ochranná tlumivka</i>	46
5.5 VLIV CHRÁNĚNÉ KOMPENZACE NA SIGNÁL HDO	47
6 NÁVRH CHRÁNĚNÉ KOMPENZAČNÍ JEDNOTKY	49
6.1 STRUČNÝ POPIS PODNIKU	49
6.2 POPIS TECHNOLOGIE PODNIKU	49
6.2.1 <i>Uložení kameniva</i>	49
6.2.2 <i>Cementové hospodářství</i>	50

6.2.3 Vodní hospodářství	50
6.2.4 Skip.....	50
6.2.5 Mísící jádro.....	51
6.2.6 Recyklační zařízení	51
6.2.7 Rozvod stlačeného vzduchu.....	52
6.2.8 Řídicí systém betonárny	52
6.2.9 Proces výroby betonové směsi	53
6.3 SKLADBA A ZAPOJENÍ SPOTŘEBIČŮ	53
6.4 NÁVRH KOMPENZAČNÍHO ROZVADĚČE	54
6.4.1 Kompenzační výkon.....	55
6.4.2 Kondenzátorová baterie a ochranné tlumivky.....	56
6.4.3 Regulátor jalového výkonu a měřicí transformátor proudu.....	59
6.4.4 Kompenzační stykače	60
6.4.5 Vodiče a jištění jednotlivých stupňů.....	61
6.4.6 Určení ztrátového výkonu rozvaděče	64
6.4.7 Rozvaděčová skříň	66
6.5 CENOVÁ BILANCE A NÁVRATNOST NAVRŽENÉ KOMPENZACE.....	67
ZÁVĚR	69
POUŽITÁ LITERATURA.....	70
PŘÍLOHY	1

Úvod

Zvyšování cen elektrické energie v ČR na úroveň cen zemí Evropské unie má negativní dopad na ekonomické hospodaření podniků. Motivují management firem k větší pozornosti energetickému hospodářství. Povinnost kompenzovat jalový výkon odebíraný z distribučních sítí a také zamezovat jeho zpětné dodávce do sítě je vynucena legislativou. Z důvodu vysokých postihů jsou rozvody výrobních podniků běžně vybaveny kompenzačním zařízením. Kompenzací se zajistí odběr v neutrálním pásmu účinníku a nemusí se tak platit cenové přírážky. Tím je zajištěno dlouhodobé snížení nákladů za dodávku elektřiny. Kompenzační zařízení mají však i vliv na charakteristické vlastnosti elektrické energie, jejíž kvalita je nejvíce narušována uživatelem. Vlivem masivního nasazování polovodičových spínacích prvků se v síti objevují harmonické složky a dochází ke změně tvaru křivky napětí. Harmonické složky mají negativní vliv na provoz kompenzačních zařízení využívající kompenzační kondenzátory, konkrétně jejich přetěžování.

V úvodních kapitolách této diplomové práce jsou vysvětleny základní principy z oblasti kompenzace jalového výkonu. Je zde zmínka o přínosech kompenzace a současně legislativě. Další kapitoly se zabývají podrobnějším rozdělením kompenzace a kompenzačních zařízení. Předposlední část je věnována negativním vlivům, které působí na kompenzační kondenzátory v sítích s vyšším obsahem harmonických a také je zde velký prostor věnován chráněné kompenzaci, která je obsahem této práce. Ta navazuje na poslední část, kde je popsán konkrétní výrobní podnik a popis jeho provozu. Znalost režimu provozu byla nutná pro vypracování praktické části, ve které byl proveden výpočet potřebného kompenzačního výkonu pro dosažení požadovaného účinníku odběru výrobního podniku a byl uveden konkrétní návrh chráněného kompenzačního rozvaděče pro daný výrobní podnik.

Seznam symbolů

U	[V]	Napětí
U_h	[V]	Napětí harmonické
U_{Sn}	[V]	Jmenovité sdružené napětí sítě
U_{Cn}	[V]	Jmenovité sdružené napětí kondenzátoru
U_C	[V]	Skutečné napětí na kondenzátoru
I	[A]	Proud
$I_{\tilde{e}}$	[A]	Činný proud
I_j	[A]	Jalový proud
I_{jk}	[A]	Jalový proud po kompenzaci
I_k	[A]	Celkový (zdánlivý) proud po kompenzaci
I_C	[A]	Proud kondenzátoru
P	[W]	Činný výkon
P_p	[W]	Činný výkon další připojované zátěže
P_{max}	[W]	Maximální příkon
P_i	[W]	Instalovaný výkon
Q	[VAr]	Jalový výkon
Q_C	[VAr]	Potřebný kompenzační výkon, výkon kompenzačního kondenzátoru
Q_k	[VAr]	Jalový výkon po kompenzaci
Q_{LC}	[VAr]	Výkon kompenzačního článku LC
S	[VA]	Zdánlivý výkon
S_k	[VA]	Zdánlivý výkon po kompenzaci
$\cos \varphi$	[-]	Účinník
$\cos \varphi_k$	[-]	Účinník po kompenzaci
$\cos \varphi_p$	[-]	Účinník další připojované zátěže
ΔP	[W]	Ztráty ve vedení
C	[F]	Kapacita kondenzátoru
L	[H]	Indukčnost
λ	[-]	Skutečný účinník
D	[VAd]	Deformační výkon
L_T	[H]	Indukčnost napájecího transformátoru
S_T	[VA]	Výkon napájecího transformátoru
f, f_n	[Hz]	Jmenovitý kmitočet sítě
f_h	[Hz]	Kmitočet h-té harmonické
f_{50}	[Hz]	Kmitočet sítě 50Hz
f_r	[Hz]	Rezonanční kmitočet

L_S	[H]	.....	Indukčnost sítě
X_C	[Ω]	.....	Kapacitní reaktance
X_L	[Ω]	.....	Indukční reaktance
X_{LC}	[Ω]	.....	Reaktance kompenzačního článku LC
$tg \delta$	[-]	.....	Ztrátový úhel kondenzátoru
P_Z	[W/kVAr]	.....	Ztráty kondenzátoru
p	[-, %]	.....	Činitel zatlumení
h_r	[-]	.....	Řád harmonické
β	[-]	.....	Činitel soudobosti

1. Základy kompenzace jalových výkonů

1.1 Princip kompenzace účinníku

Optimální podmínky pro přenos elektrické energie jsou pouze při přenosu činného výkonu. Činný výkon P je dán součinem efektivních hodnot napětí, proudu a účinníku. Představuje střední hodnotu okamžitého výkonu. Jednotka činného výkonu je watt. Platí

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (1.1)$$

Pro třífázovou soustavu platí

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (1.2)$$

Činný výkon převádí energii ve spotřebičích na jiný druh energie, například na mechanickou nebo tepelnou. Avšak značná část elektrických spotřebičů jsou induktivního charakteru a potřebují ke své činnosti vytvářet točivé či netočivé magnetické pole. Jedná se zejména o asynchronní motory, které jsou dnes nejpoužívanějším pohonem, transformátory, indukční pece apod. K vytvoření magnetického pole je potřeba jalového výkonu Q . Jalový výkon se přelévá ze zdroje do místa spotřeby a zpět. Ve spotřebiči slouží pouze k vytvoření elektromagnetického (v případě indukčního spotřebiče) nebo elektrického (v případě kapacitní spotřeby) pole, ale není jako výkon činný přeměněn na užitečnou práci. Jednotka jalového výkonu Q je voltampér reaktanční, značený VAR. Platí vztah

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ [VAR]} \quad (1.3)$$

Pro třífázovou soustavu platí

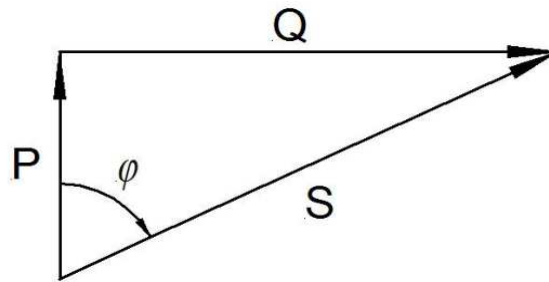
$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ [VAR]} \quad (1.4)$$

Přestože se jalový výkon ve spotřebiči neproměňuje, je potřeba ho po obvodu přenášet, což má za následek ztráty na vedení. Snahou je jalový výkon minimalizovat.

Z praktických důvodů se ještě definuje tzv. zdánlivý výkon. Zdánlivý výkon nemá přímý fyzikální význam, ale je důležitý zejména z toho důvodu, že mnoho elektrotechnických zařízení má vlastnosti závislé na napětí a na proudu (na jejich fázovém posuvu φ). Zdánlivý výkon lze chápat jako největší možný výkon, dosažitelný při nulovém fázovém posuvu (odporová zátěž). Jednotka zdánlivého výkonu S je voltampér, značený VA. Platí vztah

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} \quad (1.5)$$

Vztah (1.5) lze geometricky vyjádřit jako tzv. trojúhelník výkonů (Obr. 1.1)

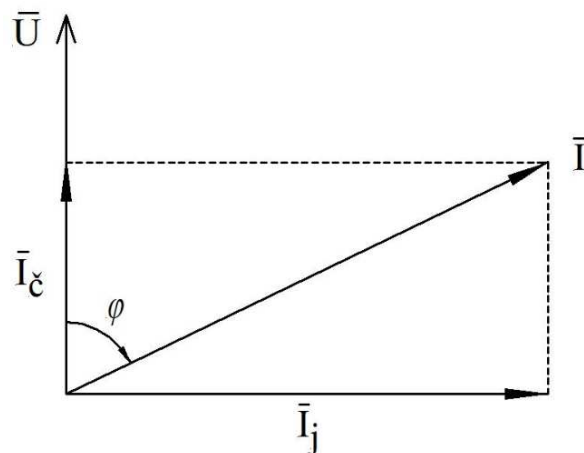


Obr. 1.1 Trojúhelník výkonů¹

Jak již bylo psáno, k vytvoření magnetického pole je potřeba jalového výkonu. Jalový výkon představuje jalový proud \mathbf{I}_j , který je zpožděn o 90° za fázovým napětím U . Ve fázi s fázovým napětím je činný proud \mathbf{I}_ε , složka činného výkonu P , jehož vektorový součet s proudem jalovým \mathbf{I}_j dává zdánlivý proud \mathbf{I} (Obr. 1.2). Pro zdánlivý proud platí vztah

$$I = \sqrt{I_\varepsilon^2 + I_j^2} \quad [\text{A}] \quad (1.6)$$

Zdánlivý proud \mathbf{I} , složka zdánlivého výkonu S , je přímo úměrný velikosti odebíraného jalového proudu. Tento proud je odebírán samotnými spotřebiči.



Obr. 1.2 Vektorový součet činného a jalového proudu

Energetickým zákonem (viz kapitola 1.3) je dáno, že výsledný fázový posun mezi odebraným napětím a zdánlivým proudem základní harmonické $\cos \varphi$ musí být v rozmezí 0,95 – 1,0 induktivního charakteru.

Pro fázový posun mezi napětím a proudem, tzv. účinník, je dán vztah

¹ Obrázky v této kapitole jsou překresleny z [1][2][3]

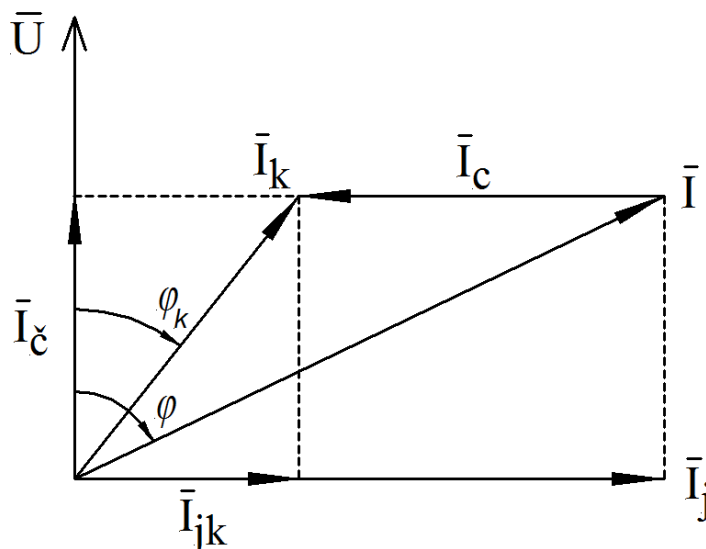
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad [-] \quad (1.7)$$

nebo také

$$\cos \varphi = \frac{I_c}{I} \quad [-] \quad (1.8)$$

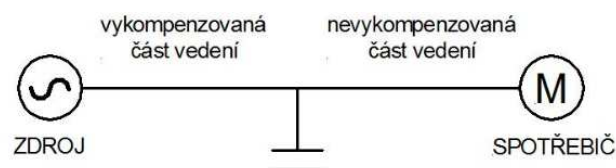
K zajištění hodnoty požadovaného účinníku musí být ze soustavy odebírán celkový proud I_k , který má stejnou hodnotu činné složky I_c , ale velmi malou hodnotu jalové složky I_j . Toho lze dosáhnout způsobem, který se nazývá kompenzace jalového výkonu nebo také kompenzace účinníku.

Snížení odběru jalové energie se provádí dodáním jalového proudu kapacitního charakteru I_c , který působí proti indukčnímu jalovému proudu, viz *Obr. 1.3*.



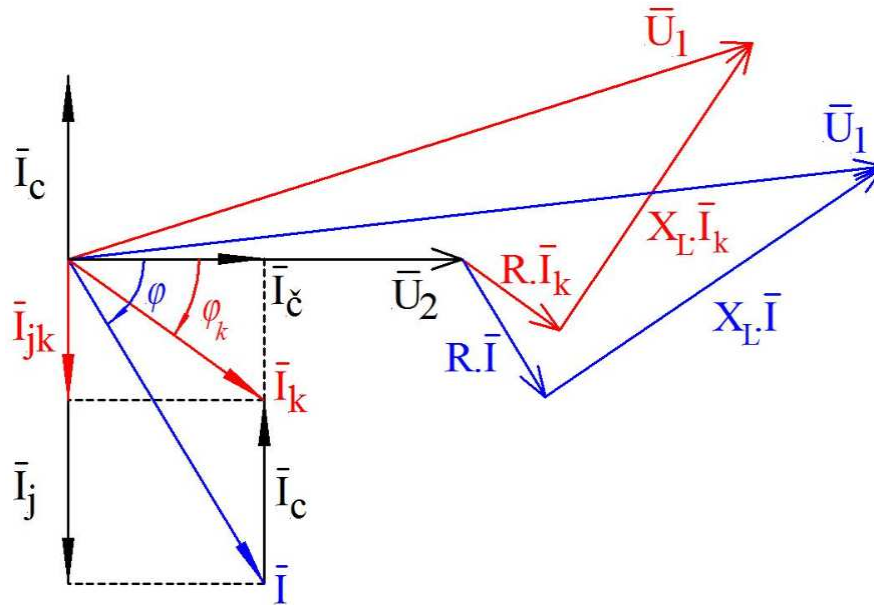
Obr. 1.3 Fázorový diagram - účinek kompenzace účinníku

Většina principů kompenzace je realizována připínáním kapacit do obvodu. Základním prvkem pro kompenzaci je tedy kondenzátor. Výsledkem je snížení celkového zdánlivého proudu, který je odebírán zátěží. Provedená kompenzace se projeví jen v napájecí části elektrické sítě, za místem připojení kompenzačního zařízení směrem ke spotřebiči se nic nezmění (*Obr. 1.4*).



Obr. 1.4 Vliv kompenzace

Z fázorového diagramu na Obr. 1.3 je patrné, že připojení kondenzátoru způsobí pokles jalové složky odebíraného proudu \mathbf{I}_j na proud \mathbf{I}_{jk} vlivem jalového proudu kondenzátoru \mathbf{I}_c , který působí proti. To má za následek zmenšení celkového zdánlivého proudu \mathbf{I} na velikost \mathbf{I}_k a účinníku φ na účinník po kompenzaci φ_k . Fázorový diagram na Obr. 1.5 ukazuje účinník a napěťové a proudové poměry před a po kompenzaci na napájecím vedení. Modrou barvou jsou označeny veličiny v nekompenzované části vedení, tedy od místa připojení kompenzačního zařízení směrem ke spotřebiči. Tento stav platí i pro celé nekompenzované vedení. Červenou barvou jsou označeny veličiny po kompenzaci.



Obr. 1.5 Kompenzace – fázorový diagram

Pro zdánlivý proud po kompenzaci \mathbf{I}_k platí

$$I_k = I \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k} \quad [A] \quad (1.9)$$

Zmenšení zdánlivého proudu způsobí pokles úbytku napětí na impedanci vedení a sníží se tak napětí U_1 . Vysvětlení problematiky uvažuje konstantní činný proud I_c a napětí U_2 .

Pokud činný výkon zůstane konstantní a změní se po připojení kondenzátoru fázový posuv z hodnoty φ na hodnotu φ_k , změní se i poměr proudů \mathbf{I}_{jk} a \mathbf{I}_j . Jejich poměr bude stejný jako tangenty příslušných úhlů

$$\frac{I_{jk}}{I_j} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_k}{\operatorname{tg} \varphi} = k \quad (1.10)$$

kde k je tzv. koeficient kompenzace.

1.2 Přínosy kompenzace účinníku

Hlavní přínosy jsou:

- Kompenzací účinníku se sníží odběr induktivního jalového výkonu. V důsledku toho se nemusí platit cenové přírážky za dodávku elektrické energie a tím se trvale sníží náklady.
- Stroje, přístroje i vedení je možno dimenzovat na menší proudy a tím klesají jejich pořizovací náklady.
- Při vyšším účinníku mohou transformátory dodávat vyšší činný výkon, dojde k odlehčení vedení i generátorů a tak je možnost jejich většího zatížení.
- Snížení odebíraného proudu po kompenzaci způsobí menší úbytky oproti nekompensovanému odběru, viz *Obr. 1.5*.
- Na ztrátách se podílejí obě složky zdánlivého proudu, proto po snížení jalového proudu dojde i k poklesu celkového proudu a tím se zmenší přenosové ztráty ve vedení a transformátorech. Pro třífázové vedení potom platí vztah

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (1.11)$$

- Může dojít ke zlepšení zkratových poměrů v síti. Na generátorech se nemusí udržovat vysoké budící napětí, pomocí něhož se reguluje vyrobená jalová energie, což má za následek i nižší nárazové a trvalé zkratové proudy v síti.

Kompenzaci účinníku je možno v mnoha případech spojit s řešením dalších problémů jako jsou filtrace vyšších harmonických, kolísání napětí apod.

1.3 Požadavky na kompenzaci jalového výkonu u odběratelů

Odběratel (s výjimkou domácností) musí ze zákona dodržet tzv. neutrální pásmo účinníku ($\cos \varphi$ 0,95 – 1,0 induktivní) při odběru elektrické energie, jinak mu bude distributor účtovat přírážku k platbě za elektrickou energii. Tato povinnost je uložena energetickým zákonem 458/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů a řízena (vymáhána) pomocí tarifní politiky, řízené Energetickým regulačním úřadem (ERÚ). Tarifní politiku určuje tzv. cenové rozhodnutí vydávané Energetickým regulačním úřadem. To standardně platí jeden kalendářní rok. V něm je také popsán způsob měření účinníku a výpočet cenové přírážky. Hodnoty procentní přírážky podle účinníku odběru jsou uvedeny v *tabulce 1.1*. Kontrole účinníku 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 účinník odběru nehlídá)

Tab. 1.1 Cenové přírázky za nedodržení účinníku $\cos\varphi$ 0,95, stav rok 2012 [9]

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

U odběrů typu A nebo B se používají ¼ hodinové odečty činné a jalové energie. Účinník je podle odběru posuzován 24 hodin denně a z naměřených hodnot se stanoví průměrná hodnota účinníku za vyhodnocované období. Tangenta φ se spočte jako podíl jalové a činné energie v daném časovém pásmu za vyhodnocované období.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{kVArh}}{\text{kWh}} [-] \quad (1.12)$$

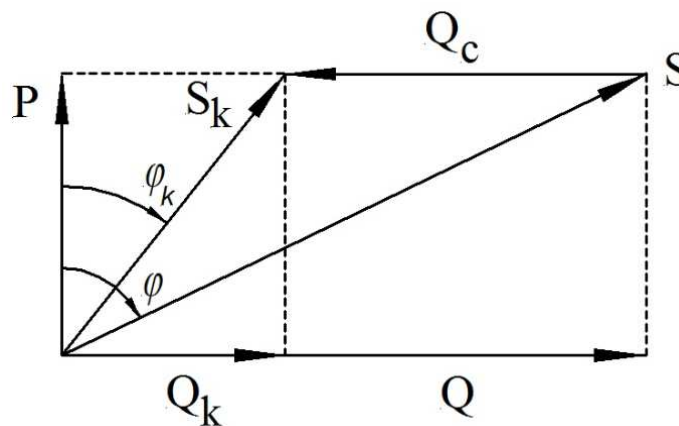
Z něj je spočten účinník a určena procentuální přírážka k ceně elektrické energie.

Odběratel může být také penalizován za nevyžádanou dodávku kapacitní jalové energie do distribuční sítě. Dodávka zpět do sítě je způsobena překompenzováním a dle cenového rozhodnutí ERÚ účtuje distributor odběrateli částku 440 Kč za MVarh (stav pro rok 2012) [9].

2. Paralelní kompenzace jalových výkonů

Kompenzační zařízení je připojeno ke spotřebiči paralelně. Princip je popsán již v kapitole 1.1. Pokud je znám činný výkon kompenzovaného zařízení, jeho účinník $\cos \varphi$ a požadovaný účinník $\cos \varphi_k$, je možno spočítat potřebný jalový výkon Q_C jako rozdíl mezi indukčním výkonem před kompenzací Q a po kompenzaci Q_k podle vztahu

$$Q_C = Q - Q_k = P \cdot \operatorname{tg} \varphi - P \cdot \operatorname{tg} \varphi_k = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) [\text{VAr}] \quad (2.1)$$



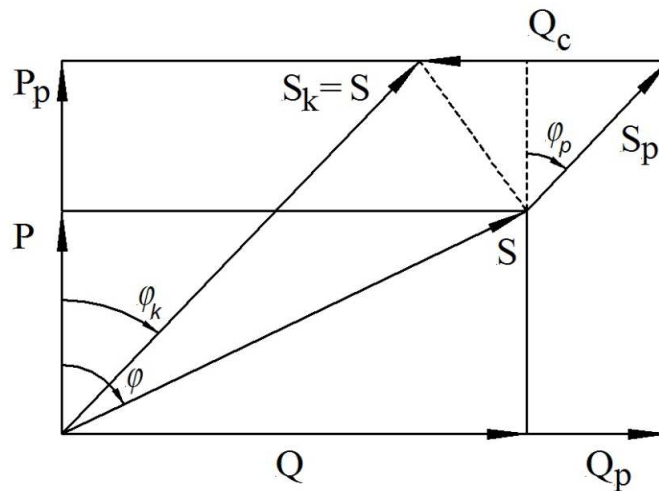
Obr. 2.1 Kompenzace podle požadovaného zvětšení účinníku²

V případě kompenzace dle požadovaného zmenšení zdánlivého výkonu, kdy je znám zdánlivý výkon S , činný výkon P , účinník před kompenzací a zdánlivý výkon po kompenzaci S_k se požadovaný kompenzační výkon vypočte dle vztahu (2.1). Fázorový diagram je totožný s Obr. 2.1. Činný výkon je před i po kompenzaci stejný. Účinník po kompenzaci $\cos \varphi_k$ je

$$\cos \varphi_k = \frac{P}{S_k} [-] \quad (2.2)$$

Při kompenzaci dle požadovaného zvětšení využití příkonu zůstane zdánlivý výkon po kompenzaci stejný ($S=S_k$) a činný výkon se zvětší.

² Obrázky v této kapitole jsou překresleny z [3]



Obr. 2.2 Kompenzace podle požadovaného zvětšení využití příkonu

Zvětší se tím využití elektrických zařízení. Je nutné znát zdánlivý výkon S , účinník před kompenzací a činný výkon připojované zátěže P_p . Účinník po kompenzaci a připojení další zátěže je

$$\cos \varphi_k = \frac{P + P_p}{S_k} = \frac{P + P_p}{S} \quad [-] \quad (2.3)$$

Požadovaný kompenzační výkon Q_C se spočte jako rozdíl jalového výkonu po připojení další nekompensované zátěže ($Q + Q_p$) a jalového výkonu po připojení další zátěže a po kompenzaci Q_k

$$Q_C = (Q + Q_p) - Q_k = (P \cdot \operatorname{tg} \varphi + P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_p) - (P + P_p) \operatorname{tg} \varphi_k \quad [\text{VAr}] \quad (2.4)$$

Pokud je účinník připojované zátěže stejný jako účinník zátěže stávající ($\cos \varphi = \cos \varphi_p$), vztah (2.4) se zjednoduší

$$Q_C = (P + P_p) (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \quad [\text{VAr}] \quad (2.5)$$

Podmínka reálnosti této kompenzace je $P + P_p \leq S$.

Paralelní kompenzaci je možné dle umístění (zapojení ke kompenzovanému spotřebiči) dále rozdělit do 4 skupin:

- individuální
- skupinová
- centrální
- kombinovaná

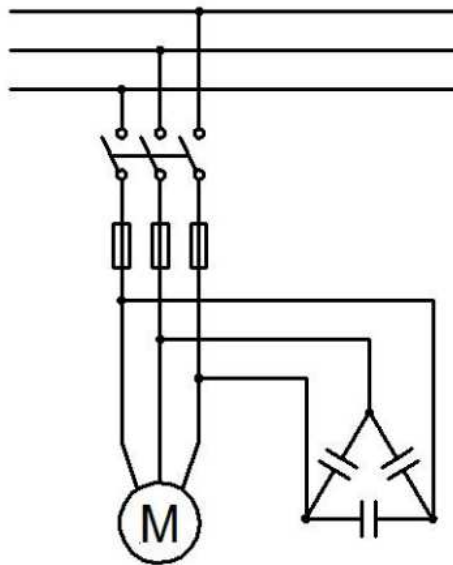
2.1 Individuální kompenzace

Kompenzační zařízení, většinou vhodně dimenzovaný kondenzátor, je připojeno přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti. To má za následek kompenzaci jalového výkonu již od spotřebiče, čímž se odlehčí celé přívodní vedení. Kromě toho také dochází ke snížení úbytku napětí na přívodním vedení. Velikost kondenzátoru je navržena podle výkonu kompenzovaného zařízení, proto nedochází k nežádoucímu překompenzování.

Individuální kompenzace vede k nejvyšším úsporám a je nejjednodušší a provozně nejspolehlivější v porovnání s ostatními způsoby kompenzace.

Její nevýhody jsou vyšší pořizovací náklady a prostorová náročnost. Je náročnější na údržbu a kontrolu, vzhledem k tomu, že kompenzovaná zařízení jsou rozptýlena po provozu. Další nevýhodou pak může být to, že využití kompenzačního zařízení závisí na využití spotřebičů, s čímž také souvisí dlouhá doba návratu investice do kompenzace vložené.

Tento druh kompenzace je využíván např. pro pohony s výkonem nad 5 kW s vysokým časovým využitím nebo u transformátorů z důvodu kompenzace jalového proudu naprázdno.



Obr. 2.3 Individuální kompenzace motoru NN

2.2 Skupinová kompenzace

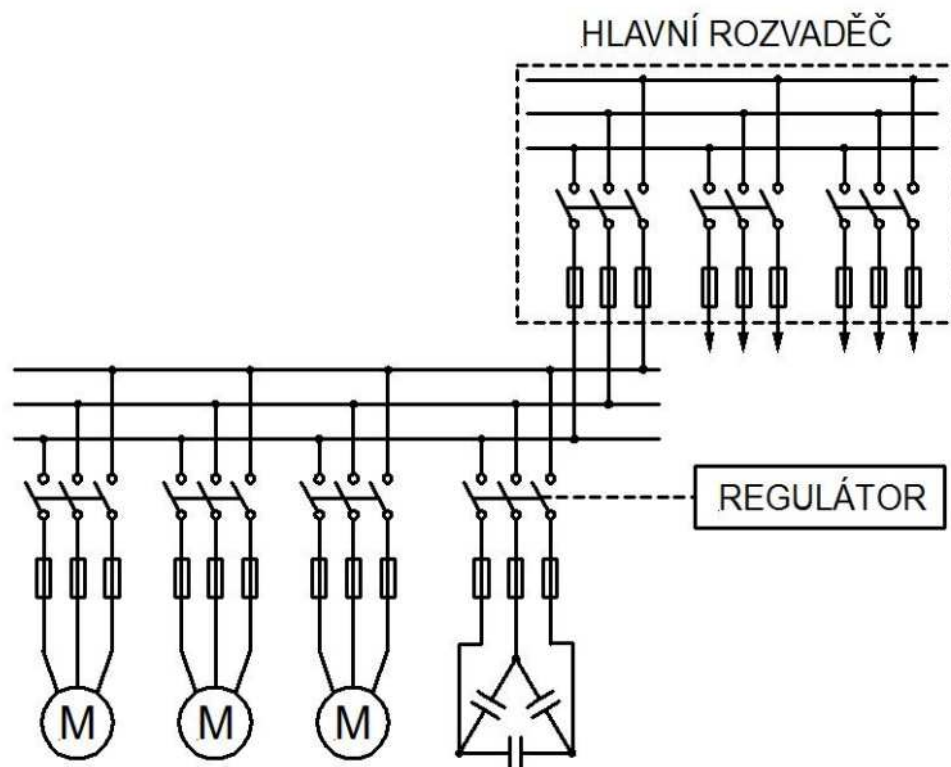
Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnice rozvaděče skupiny spotřebičů. Kompenzační výkon skupiny kondenzátorů - kompenzační baterie, je navržena s ohledem na soudobý odebíraný výkon. Ten je menší než v případě individuální kompenzace každého spotřebiče a zjistí se měřením.

Výhodou je použití menšího počtu kondenzátorů, než u individuální kompenzace

(kompenzační výkon je tedy nižší). U této kompenzace se odlehčí pouze vedení mezi rozvaděčem a zdrojem, vedení mezi spotřebičem a kompenzačním zařízením zůstává nekompenzováno.

Kompenzační baterie je většinou rozdělena na více skupin kondenzátorů, tzv. stupňů. To sebou nese nevýhodu nutnosti použití spínacích a jisticích prvků kondenzátorů, které musí být řízeny regulátorem jalového výkonu.

Nejvíce se používá u rozvodů nízkého napětí. Je vhodná pro skupiny spotřebičů, nejčastěji skupiny motorů s výkonem pod 5 kW, které jsou používány v přerušovaném nebo krátkodobém provozu. Většinou se kompenzují jednotlivé podružné rozvaděče napájející jednotlivé skupiny spotřebičů.



Obr. 2.4 Skupinová kompenzace

2.3 Centrální kompenzace

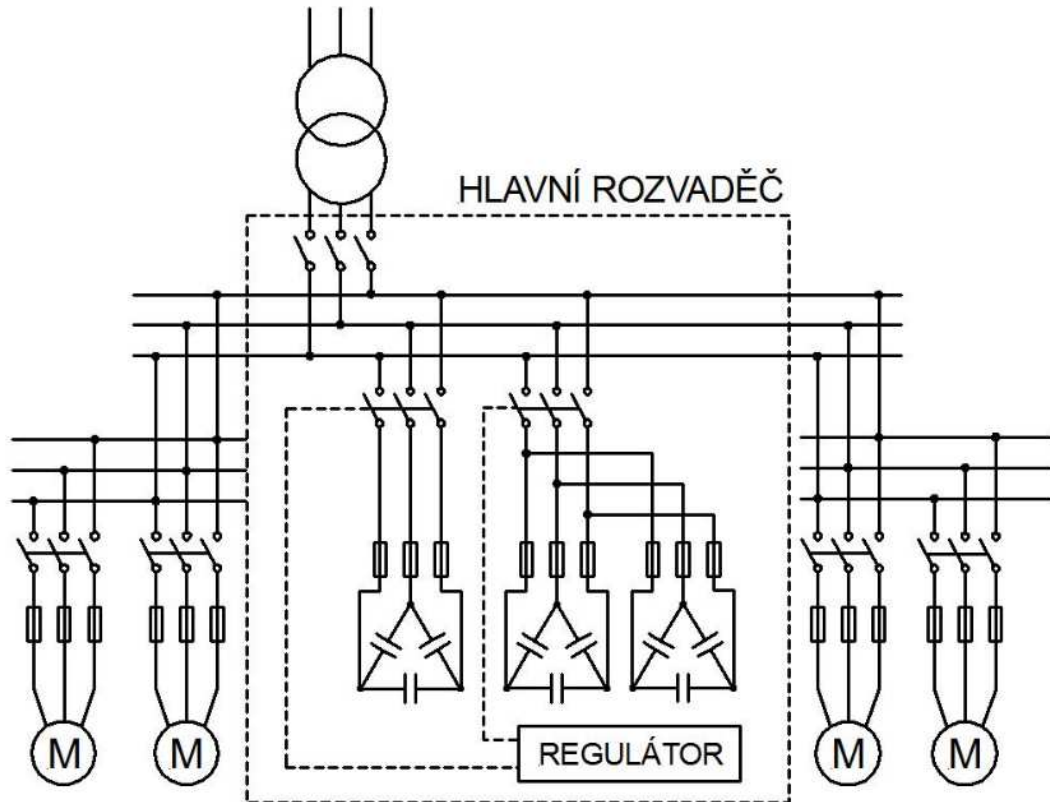
Při centrální kompenzaci se kompenzační zařízení většinou připojuje přímo na vstupní přípojnice hlavní rozvodny podniku nebo hlavního rozvaděče. Znamená to, že rozvody uvnitř kompenzovaného podniku nejsou kompenzovány. Je zde také potřeba regulátoru jalového výkonu.

Výhodou je umístění kompenzačního zařízení na jednom místě, s čímž souvisí jednoduchá údržba a kontrola systému. Další výhodou je potřeba menšího kompenzačního výkonu, který

je opět vypočítáván ze soudobého odebíraného výkonu.

Nevýhoda je ve větší složitosti. Jsou nutné tzv. kompenzační rozvaděče, které jsou vybaveny potřebnou regulační technikou.

Použití je u menších průmyslových závodů s málo proměnlivým zatížením.



Obr. 2.5 Centrální kompenzace

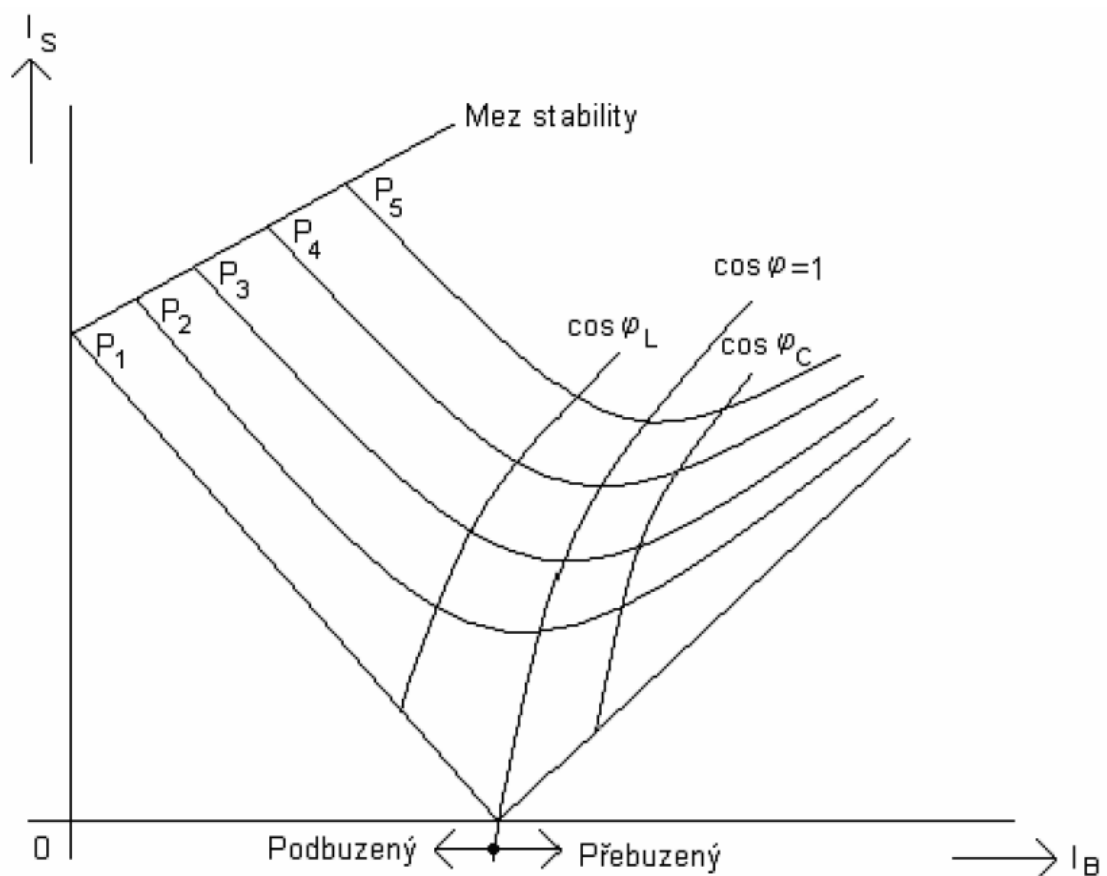
2.4 Kombinovaná kompenzace

Kombinovaná kompenzace je nejčastěji používaným řešením kompenzace účinníku, zejména v rozsáhlých průmyslových sítích. Je využito výhod všech třech předcházejících způsobů kompenzací. Velké pohony, které jsou trvale v provozu, se kompenzují pomocí individuální kompenzace. Skupinová kompenzace se používá pro skupiny menších pohonů. Centrální kompenzace se uplatní v napájecím bodě podniku, takže výsledný účinník se bude pohybovat v předepsaných mezích.

3. Druhy kompenzačních zařízení

3.1 Rotační synchronní kompenzátory

Ke kompenzaci jalového výkonu lze použít synchronní motor pracující naprázdno. Změnou jeho buzení lze v dostatečném rozsahu měnit jeho účinník jak v oblasti indukční, tak i kapacitní. Tím je možná změna dodávky či spotřeby jalového výkonu. Na Obr. 3.1 jsou zobrazeny tzv. v-křivky synchronního stroje, které vyjadřují závislost statorového proudu na proudu budícím. Synchronní stroj pracující v režimu kompenzátoru využívá přebuzeného stavu, při kterém představuje zdroj indukční jalové energie.



Obr. 3.1 V-křivky synchronního stroje [4]

Kompenzátory jsou konstruovány převážně pro hladiny VN, obvykle pro síť 6kV. Jmenovité výkony se pohybují v rozmezí 5 až 15MVar. K rozvodnám o vyšším napětí jsou připojovány přes transformátor. Regulace dodávky jalového výkonu je provázena zpožděním. Jsou proto nevhodné tam, kde se potřeba jalového výkonu dynamicky mění, např. při kompenzaci oboukrových pecí nebo regulovaných pohonů. V těchto případech při potřebě jalového výkonu dochází vlivem zpoždění k nedokompenzování, v opačném případě k překompenzování. To má vliv na výsledné kolísání sítě, které na změnách jalového výkonu

závisí. Svou funkci splní například při centrální kompenzaci větších průmyslových sítí, kde je odběr jalového výkonu víceméně stabilní nebo se mění bez dynamických rázů.

Provoz těchto zařízení je spojen se spotřebou činné energie (buzení stejnosměrným proudem), vyššími nároky na údržbu a na zastavěný prostor. Rotační kompenzační zařízení jsou z těchto důvodů na ústupu a jsou nahrazovány statickými.

3.2 Statické kompenzátory

Za statické kompenzátory jsou považována všechna kompenzační zařízení kromě rotačních synchronních kompenzátorů. Na rozdíl od rotačních kompenzátorů nejsou závislé na dodávce činné energie. Jedná se o prosté (výkonové) kondenzátory nebo baterie kondenzátorů, které jsou soustředěny v kompenzačním rozvaděči, kde jsou umístěny také spínací a jistící prvky, regulátor jalového výkonu a další pomocná zařízení. V sítích s vyšším podílem harmonického rušení jsou kondenzátory doplněny ochrannými tlumivkami a tvoří tak chráněnou kompenzaci nebo kompenzační filtry. Vlivu harmonického rušení na kondenzátory je věnována kapitola 5. Samostatnou kapitolou jsou filtry aktivní.

3.2.1 Prostá (klasická) kompenzace

Samostatně instalované kondenzátory se používají k prosté (klasické) kompenzaci. Nejsou nijak chráněny. Použití kondenzátoru nebo kondenzátorových baterií vyžaduje zabezpečení třech hlavních požadavků – tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu, odolnost proti přepětí a spolehlivost a bezpečnost provozu. Ke kompenzaci mohou být použity samotné kondenzátory pouze v sítích s minimálním podílem nelineárních zátěží (10 – 15 % výkonu napájecího transformátoru). Ke kompenzaci jsou nejčastěji používány třífázové kondenzátory, zapojené do hvězdy či trojúhelníku. Po připojení na napětí má 3f kondenzátor jalový výkon Q_C dle vztahu

$$Q_C = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U^2 \quad [\text{VAr}] \quad (3.1)$$

dále

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{VAr}] \quad (3.2)$$

při zapojení kondenzátoru do trojúhelníka. Při zapojení kondenzátoru do hvězdy platí

$$Q_C = \omega \cdot C \cdot U^2 \quad [\text{VAr}] \quad (3.3)$$

a dále

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{VAr}] \quad (3.4)$$

Platnost předchozích vztahů je podmíněna symetrickým trojfázovým zapojením, tedy stejnými hodnotami všech kondenzátorů.

Velký vliv na životnost kondenzátorů má provozní teplota a přepětí. Nadměrná teplota má negativní vliv na dielektrikum. Při nepříznivých podmínkách chlazení je možné použít kondenzátory s vyšším jmenovitým napětím.

3.2.1.1 Konstrukce kompenzačních kondenzátorů NN

Ke kompenzaci na hladině NN jsou nejčastěji používány třífázové kondenzátory. Třífázový kondenzátor je tvořen třemi jednofázovými kondenzátorovými svitky o stejné kapacitě, zapojené obvykle do trojúhelníka, tedy na sdružené napětí. V současnosti se nízkonapěťové kondenzátory vyrábějí v systémech MKP nebo MKV. V systému MKP jsou použity svitky z jednostranně metalizované polypropylénové fólie s velmi nízkými dielektrickými ztrátami. Svitky jsou zality v hliníkové nádobě pomocí pevné netoxické hmoty rostlinného původu. Ta je ekologicky nezávadná a nehrozí znečištění životního prostředí.

Systém MKV tvoří elektrody z oboustranně pokoveného papíru, dielektrikem je polypropylénová folie. Celý systém je impregnován v minerálním oleji. MKV kondenzátory jsou proto vhodné pro vyšší výkonové zatížení a vyšší okolní teplotu.

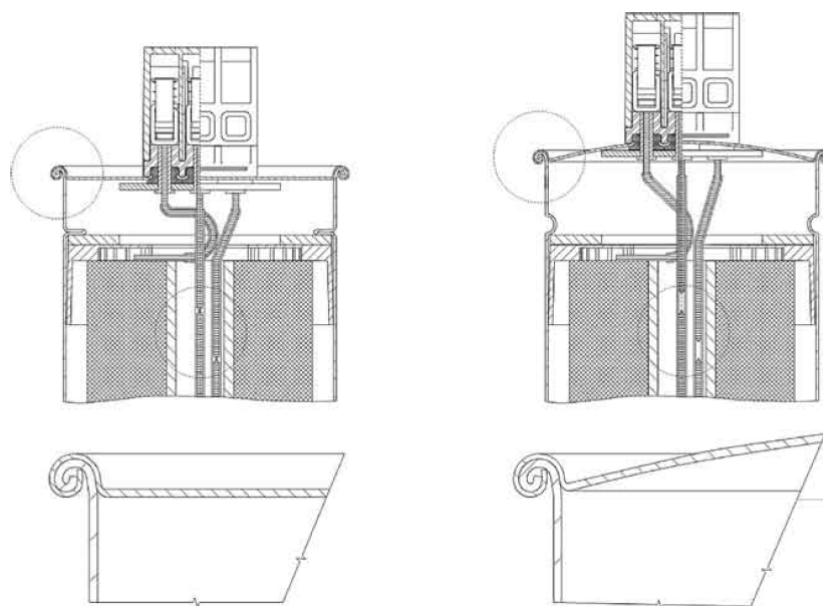
Oba dva systémy jsou samohojivé (samoregenerační). Znamená to, že pokovená vrstva se v důsledku případného napěťového průrazu odpaří. Vzniklá izolační plocha je velice malá a nemá vliv na funkci kondenzátoru.



Obr. 3.2 Kompenzační kondenzátory NN firmy ZEZ Silko [5]

Nádoba kondenzátoru je chráněna proti roztržení tzv. přetlakovým odpojovačem. Ten např. při tepelném nebo elektrickém přetížení a vyboulení víka nádoby mechanicky přeruší přívody

svorkovnic k samotným svítkům a zajistí tak bezpečné odpojení kondenzátoru, viz Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Funkce odpojovače [5]

Kondenzátory jsou vybaveny třemi vestavěnými vybíjecími rezistory. Ty musí zajistit vybití zbytkového napětí kondenzátoru na minimálně 75V během tří minut. Pro jištění kondenzátorů se doporučují volit výkonové pojistky s pomalými charakteristikami (gG) se jmenovitým proudem 1,6 až 1,8 násobku jmenovitého proudu kondenzátoru.

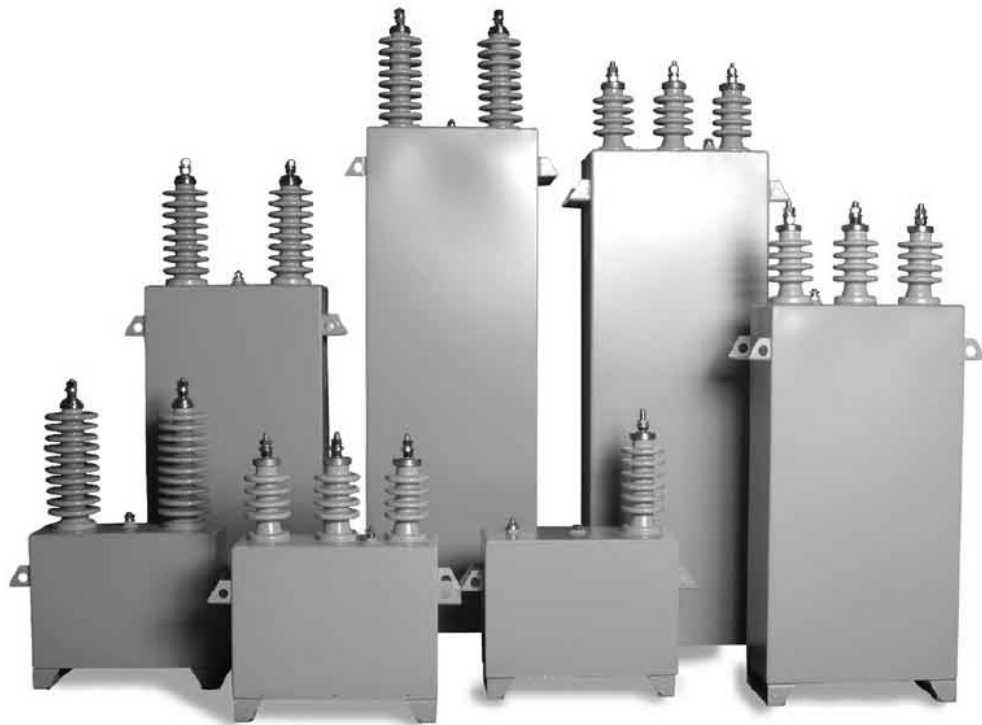
V katalogích jsou také uvedeny délky trvání provozu kondenzátorů při vyšším napětí než jmenovitém a násobky jmenovitého proudu, který může trvale kondenzátor snášet. Důležitým ukazatelem jsou rovněž dovolené teploty okolí. V současnosti se vyrábějí kondenzátory NN o jmenovitém výkonu v rozmezí 1 – 50 kVAr a na napětí 230-800 V (konkrétně 400V, 440V, 525V a 690V).

3.2.1.2 Konstrukce kompenzačních kondenzátorů VN

Dielektrikum kondenzátorů tvoří polypropylenová fólie impregnovaná syntetickou kapalinou, která je zdravotně i ekologicky nezávadná. Elektrody jsou tvořeny hliníkovou fólií. Tato konstrukce zajišťuje ztráty přibližně stejně nízké, jako u kondenzátorů na nízké napětí. Kondenzátory VN jsou v plně izolovaných nádobách jako třífázové jednotky zapojené do hvězdy (nižší napěťové nároky pro jednotlivé svítky) nebo jako jednofázové. Jsou, stejně jako kondenzátory NN, vybaveny vnitřními vybíjecími rezistory, které zajistí vybití na stanovených 75 V do 10 minut. Jejich bezpečný provoz lze zajistit tlakovým čidlem. Ostatní katalogové hodnoty jsou obdobné jako u kondenzátorů nízkého napětí.

Třífázové kondenzátory VN jsou v současnosti vyráběny pro jmenovité výkony

25–1000kVAr a napětí 1-24kV, jednofázové 25 – 1000kVAr a napětí 1-24kV [5].



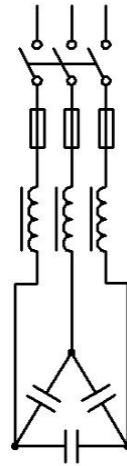
Obr. 3.4 Kompenzační kondenzátory VN firmy ZEZ Silko [5]

3.2.2 Chráněná (hrazená) kompenzace

Hrazená kompenzace je určena do sítí, které obsahují vyšší množství harmonických frekvencí, dále do provozů, kde je nutné omezit rušivé působení kompenzačních rozvaděčů na rozvodnou soustavu a tam, kde hrozí nebezpečí vzniku rezonance mezi kompenzačním kondenzátorem a indukční reaktancí sítě (napájecího transformátoru). Ty spolu tvoří rezonanční obvod. Pokud existuje harmonická o kmitočtu blízkém rezonanční frekvenci, uvede obvod do rezonančního stavu. Obvodem začne procházet vysoký proud, který bude, společně se současnou deformací napětí, nadměrně zatěžovat kompenzační kondenzátory a snižovat jejich životnost. Tomu se dá ve většině případů zabránit zapojením předřazené ochranné tlumivky a tím posunout rezonanční kmitočet.

Nevýhoda chráněné kompenzace je vyšší cena v porovnání s kompenzací nechráněnou.

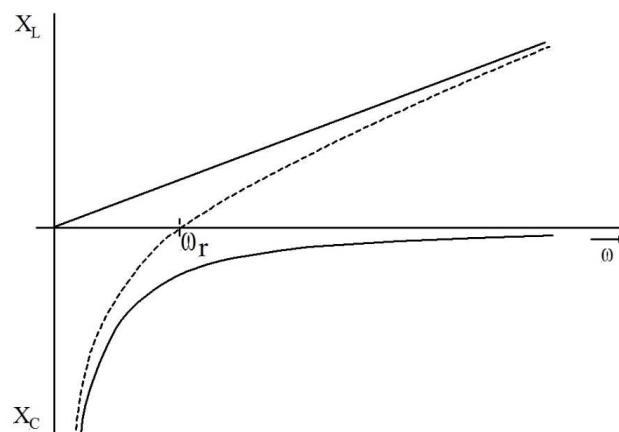
Podrobněji se chráněnou kompenzací zabývá kapitola 5.4.

Obr. 3.5 Chráněný kompenzační stupeň³

3.2.3 Kompenzační filtry

V případě potřeby lze pomocí vhodného zapojení LC obvodů vytvořit zařízení, které je schopno kompenzovat účinník a zároveň omezovat konkrétní harmonickou. Toho je dosaženo tím, že obvod má rezonanční kmitočet shodný s kmitočtem některé vyšší harmonické vyskytující se v síti a tudíž bude úroveň této harmonické v síti snižovat. Tato zařízení se nazývají kompenzační filtry.

Pro frekvence nižší než harmonické má filtr kapacitní charakter a kompenzuje jalový výkon. V případě dosažení rezonančního kmitočtu představuje obvod pro vyšší harmonickou nejnižší impedanci, viz Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Kmitočtová charakteristika kompenzačního filtru

Pro frekvence vyšší než rezonanční se obvod chová jako tlumivka (má induktivní charakter). Impedance tohoto obvodu je dána vztahem

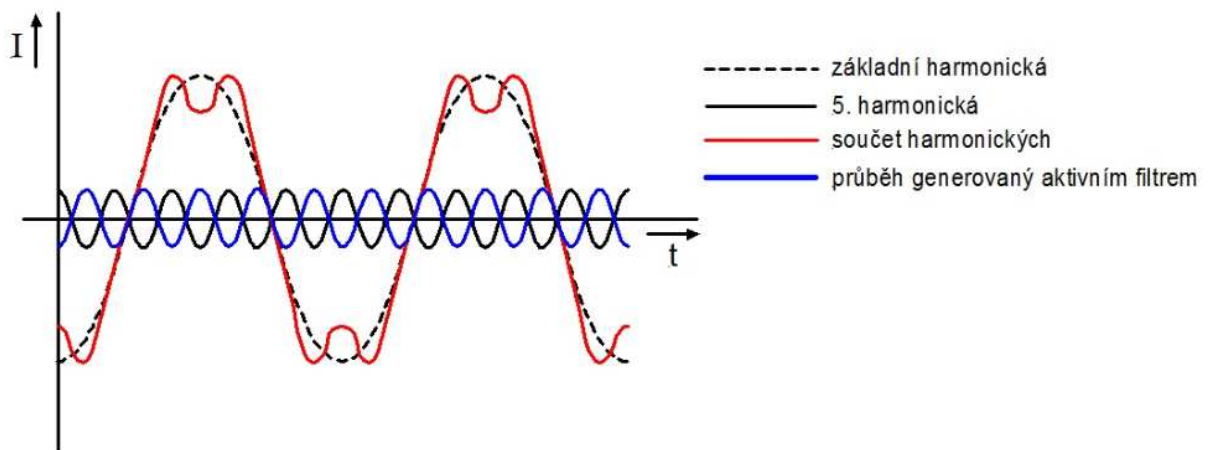
³ Obrázky v této kapitole jsou překresleny z [3][11]

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) [\Omega] \quad (3.5)$$

Používají se hlavně v průmyslových sítích VN (obloukové a indukční pece) a tam, kde je ovlivnění sítě konkrétními vyššími harmonickými vysoké. Většinou bývá použito více samostatných LC obvodů, tzv. stupňů, které jsou naladěny na různé frekvence harmonických vyskytující se ve spektru proudu kompenzovaného spotřebiče, např. na 5., 7., 11. atd. Při spínání jednotlivých stupňů je důležité dodržovat pořadí připínání stupňů. Stupeň naladěný na nejnižší kmitočet odpínat jako poslední a připínat jako první. V případě, že nejprve bude připojen stupeň naladěný na nejvyšší řád harmonické, bude pro harmonické nižších řádů, které ještě nejsou eliminovány zapojením filtru, představovat kapacitní reaktanci a může dojít k nežádoucí paralelní rezonanci s reaktancí sítě (o paralelní rezonanci více pojednává kapitola 5.2). Ta může způsobit zvýraznění některé harmonické složky napětí a deformovat napětí v místě připojení spotřebiče. Tím se zvýší rušení ostatních spotřebičů [3].

3.2.4 Aktivní filtry

Aktivní filtry je možné popsat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory proudu, řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech bylo zajištěné požadované potlačení nevhodných harmonických složek. Pracují na principu generace inverze tzv. zbytkové křivky. Zbytková křivka vznikne při odečtení základní harmonické od nesinusového průběhu. Po připojení filtru do sítě zůstane v síti pouze základní harmonická (ideálně). Princip je popsán na Obr. 3.7.



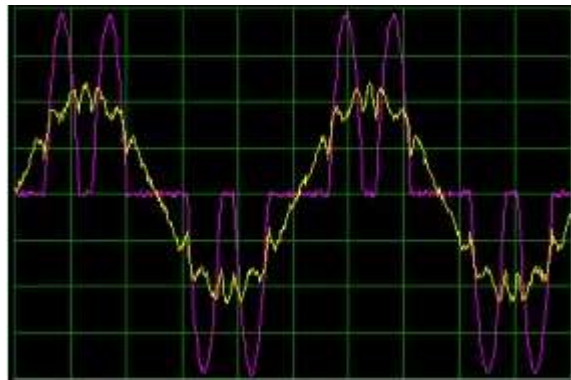
Obr. 3.7 Princip aktivního filtru

Aktivní filtry plní kromě kompenzace jalového výkonu a potlačení vyšších harmonických proudů, napětí nebo obojího (záleží na zapojení) i jiné funkce, např. odstranění kolísání napětí nebo nesymetrie napětí.

Tato zařízení se začínají s nástupem IGBT tranzistorů teprve prosazovat. Pro hladiny nízkého napětí jsou projektovány filtry pro výkony řádově do stovek kVA. Pro hladiny VN jsou teprve ve fázi prototypových zařízení. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady.

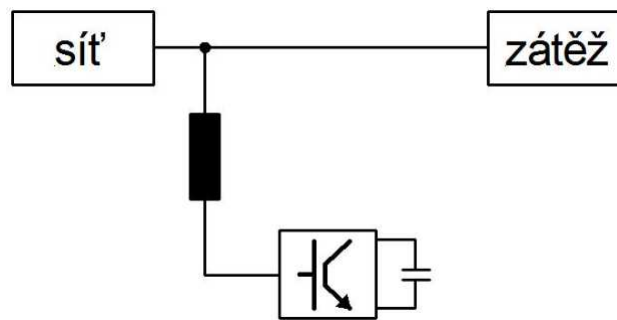
3.2.4.1 Paralelní aktivní filtry

Paralelní aktivní filtr je tvořen řízeným generátorem proudu, který je zapojen paralelně k zátěži. Ten je schopen generovat harmonické proudy, které jsou v protifázi s harmonickými složkami generovanými zátěží. Ty zavádí do sítě a harmonické složky filtru a zátěže se navzájem vyruší tak, že zátěž se jeví, jakoby žádné nežádoucí harmonické složky negenerovala. Do sítě tečou jen zbytkové rušivé proudy, které však jsou již tolerovány (viz. Obr. 3.8).



Obr. 3.8 Průběh proudu odebíraného ze sítě (před filtrací fialová křivka, po filtraci žlutá křivka)[10]

Tímto způsobem je filtrován proud odebíraný ze sítě, a zároveň se upravují deformace napětí způsobené zátěží. Je tedy možné provést kompenzaci v každém okamžiku výskytu harmonických bez možného vzniku nežádoucí rezonance. Za pomoci generování základní harmonické proudu je filtr schopen provádět velmi rychlou kompenzaci jalového proudu, případně souslednými a nesouslednými složkami upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou.



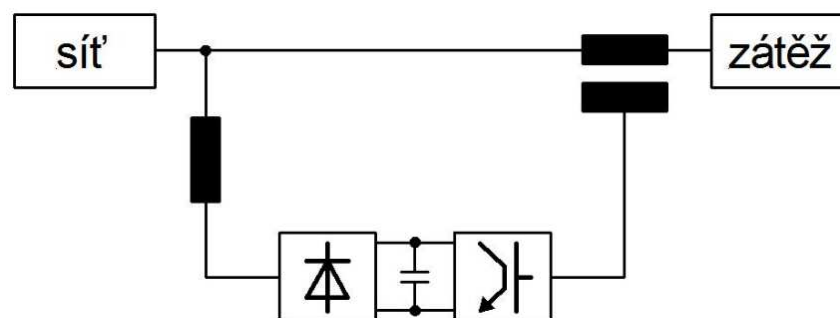
Obr. 3.9 Paralelní aktivní filtr

Generátor proudu či napětí je tvořen můstkovým zapojením tranzistorů IGBT. Obsahuje šest spínačů a zdroj napětí nebo proudu. V praxi se osvědčil typ s napěťovým zdrojem tvořený kondenzátorem. Pomocí pulzní šířkové modulace lze realizovat libovolný průběh napětí či proudu. Mezi vývody filtru a sítě je nutno zařadit pasivní filtr pracující jako dolní propust, protože generovaný průběh obsahuje velké množství harmonických v oblasti spínací frekvence generátoru (desítky až stovky kHz).

3.2.4.2 Sériové aktivní filtry

Sériový aktivní filtr je tvořen řízeným generátorem napětí, který je zapojen mezi svorky sítě a svorky spotřebiče. Umožňuje upravit přiváděné napětí na požadovaný tvar. Na rozdíl od paralelního filtru je zde tedy upravováno napětí.

Má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické, zajistit symetrické rozložení napětí a v neposlední řadě dodávat energii v případě výpadku napájení (za podmínky napájení filtru záložním zdrojem).

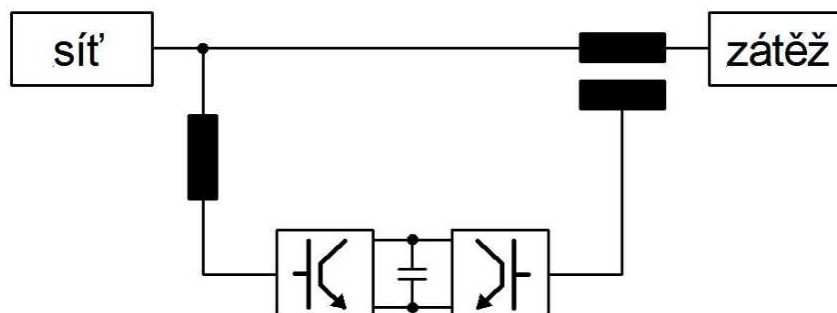


Obr. 3.10 Sériový aktivní filtr

Z popisu obou způsobů zapojení filtrů je zřejmé, že paralelní filtr upravuje vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji, kdežto sériový filtr směrem od zdroje k zátěži.

3.2.4.3 Kombinované aktivní filtry

Kombinace sériového a paralelního zapojení zajistí jak vhodné napětí v místě připojení filtru, tak i definovaný průběh odebíraného proudu. Toto zapojení umožňuje i regulaci vstupního napětí v případě přepětí. Jsou známy též jako liniové kondicionéry.



Obr. 3.11 Kombinovaný aktivní filtr

4 Způsoby řízení kompenzace

4.1 Regulátory jalového výkonu

Regulátory jalového výkonu jsou přístroje, které měří aktuální účinník a vhodným spínáním kompenzačních stupňů kondenzátorů dosahují požadované hodnoty účinníku. Měření účinníku se provádí na základě měření napětí a proudu. Regulátor provádí výpočet základní harmonické složky činného a jalového proudu algoritmem FFT. Tím je zajištěna přesná funkce měření a regulace i v sítích s vyšším podílem harmonického zkreslení. Regulátory jsou dle typu vybaveny reléovými nebo tranzistorovými výstupy (nebo kombinací obou výstupů). K některým typům je též možno připojit dekompenzační tlumivky.

V současnosti používané řady regulátorů obsahují měření a zobrazení harmonického zkreslení napětí (THD), vybraných harmonických složek a činitele harmonického zatížení kondenzátorů (CHL – celkové proudové zatížení). Mezi pokročilými funkcemi jsou např. povolená mez harmonických (při překročení jsou kondenzátory odpojeny), více hodnot cílového účinníku (snížení hodnoty požadovaného účinníku mimo tarif lze dosáhnout snížením počtu sepnutí kompenzačních sekcí a tím prodloužit životnost kompenzačního zařízení), alarm na množství chybových hlášení nebo využití teplotního čidla (ochrana proti přehřátí, spínání motoru ventilátoru nuceného chlazení, vytápění rozvaděče), díky kterému mohou být regulátory vyšších řad instalovány v náročných klimatických podmínkách (-40 až +60 °C). V

dnešní době jsou nejvíce používané regulátory Janitza Prophi nebo častější Novar (Obr. 4.1).



Obr. 4.1 Regulátor jalového výkonu Novar 1114 [6]

4.1.1 Měřicí transformátor proudu

Měření proudu je prováděno za pomoci měřicího transformátoru proudu (MTP). Jeho výstupem je sekundární proud, jehož hodnota s danou přesností sleduje průběh proudu na straně primární. Díky tomu je možno měřit vysoké proudy na přístrojích s nízkým proudovým rozsahem. MTP zároveň zajišťují elektrické oddělení mezi měřeným a měřícím obvodem, což zvyšuje bezpečnost. Přístrojový transformátor proudu se většinou umísťuje do stejné fáze, ze které je odebíráno napájecí i měřící napětí pro regulátor (většinou fáze L1). Díky rozebíratelnosti jádra je lze instalovat bez přerušení kabelu.

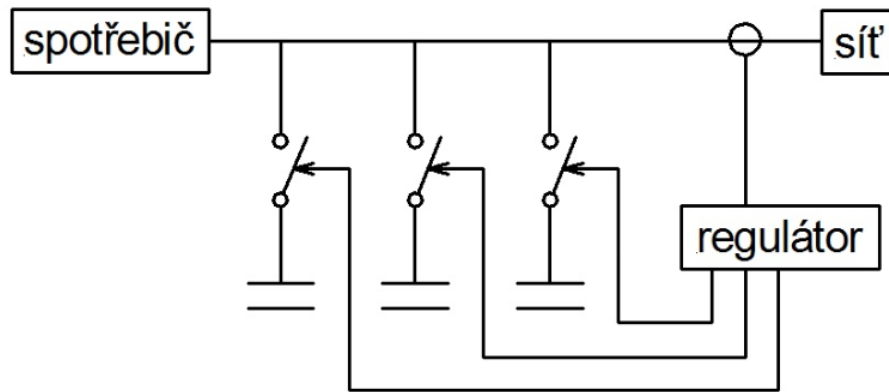
V současnosti se vyrábějí MTP s rozsahem primárních proudů od 100 do 5000A, výstupním proudem o hodnotě 1A nebo 5A a použitím pro maximální napětí sítě 0,72kV.



Obr. 4.2 Měřicí transformátory proudu s dělitelným jádrem [5]

4.2 Stupňovité spínání

Stupňovité spínání je v současné době nejpoužívanějším kompenzačním prostředkem v průmyslových sítích. Při stupňovitém spínání je celkový kompenzační výkon zařízení rozdělen do paralelně řazených kondenzátorových baterií (hrazené kompenzace nebo kompenzačních filtrů), jejichž připínání a odpínání je řízeno regulátorem jalového výkonu dle okamžitého stavu ve sledované síti.



Obr. 4.3 Princip stupňovitého spínání⁴

Volba počtu kompenzačních stupňů je závislá na velikosti jednoho stupně, na celkovém kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě účinníku (obvykle $\cos\varphi_k \geq 0,95$, neboli $\operatorname{tg}\varphi_k \leq 0,33$). Pro stupně se stejným kompenzačním výkonem pak platí vztah:

$$\frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \leq \operatorname{tg}\varphi_k \quad (4.1)$$

kde

Q_L – jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu P

Q_{C1} – jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

N – počet stupňů

Z předchozí nerovnosti je možné určit vztah pro počet kompenzačních stupňů:

$$N \geq \frac{Q_L - P \operatorname{tg}\varphi_k}{Q_{C1}} \quad (4.2)$$

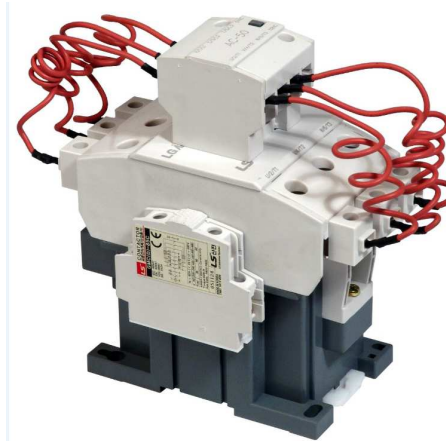
V praxi se jednotlivé připínané stupně nevolí stejně velké. Výše uvedené odvození platí pro určení nejmenšího spínaného stupně, další stupně se volí jako jeho násobky (v praxi označováno jako váha regulátoru, např. 1:1:2:4:6:8).

Stupňovité spínání je možno dále rozdělit na kontaktní a bezkontaktní.

⁴ Obrázky v této kapitole jsou překresleny z [2][3][5][11]

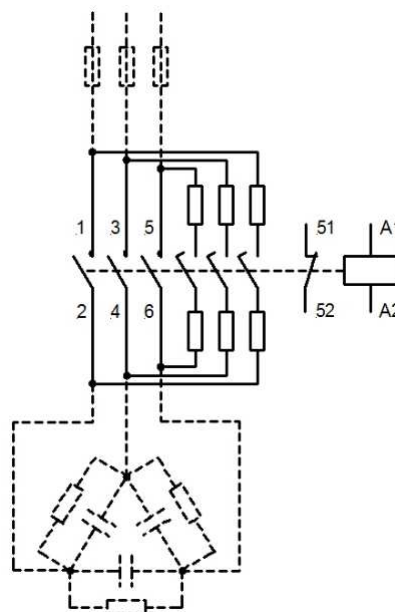
4.2.1 Kontaktní spínání

Kontaktní spínání pracuje na principu přímého připínání kondenzátorů nebo chráněných kompenzačních sekcí. Jako spínací prvek se používají kondenzátorové stykače, připojené na reléové výstupy regulátoru. Některé stykače jsou vybaveny blokem tří předstihových kontaktů v sérii s šesti rychlovybíjecími odpory, tzv. stykače s odporovým spínáním, viz *Obr. 4.4*.



Obr. 4.4 Kondenzátorový stykač GMC [7]

Předstihové kontakty zajišťují v první fázi sepnutí omezení amplitudy nabíjecího proudu kondenzátoru (amplituda je vyšší než 100-násobek jmenovitého proudu kondenzátoru). Ve druhé fázi sepnutí jsou předstihové kontakty odpojeny a současně sepnuty hlavní kontakty, přes které je již veden jmenovitý proud. Schéma zapojení stykače je na *Obr. 4.5*.



Obr. 4.5 Schéma zapojení kondenzátorového stykače s odporovým spínáním

Stykače s odporovým spínáním se používají u prosté kompenzace, která znemožňuje použití klasických stykačů a je potřeba omezit přechodný děj. Výhodou těchto stykačů je dlouhá elektrická životnost až 200 tisíc sepnutí, snížení ztrát během sepnutí a úspora energie. Použití stykačů je však omezeno jejich povoleným počtem sepnutí za hodinu, které se pohybuje od 100 do 240 spínacích operací za hodinu (počet povolených operací klesá s narůstajícím spínaným výkonem).

U chráněné kompenzace je amplituda nabíjecího proudu omezována předřazenou ochrannou tlumivkou a ke spínání je tak možno použít klasické stykače.

Kontaktní spínání se používá u kompenzací, kde nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost kompenzace a kde se nevyskytují vyšší harmonické složky proudu. Velkou nevýhodou je vznik rušivých jevů vlivem nesynchronního spínání, které mají zpětný vliv na napájecí síť. Ty často způsobují rušení citlivých elektronických zařízení, měřící a regulační techniky, elektronických vah apod. Tato nevýhoda je částečně eliminována předřazením ochranných tlumivek. Pro úroveň VN se používají vakuové stykače, které jsou speciálně navrženy pro průmyslové aplikace, kde je vyžadován velký počet sepnutí.

4.2.2 Bezkontaktní spínání

U bezkontaktního spínání je spínací prvek (stykač) nahrazen bezkontaktním spínačem. Bezkontaktní spínání se používá tam, kde jsou kladeny vyšší nároky na rychlost změny jalového výkonu. Jako spínač bývají nejčastěji použity tyristorové spínací moduly, ovládané tranzistorovými výstupy regulátoru. V současnosti se používají tyristorové moduly Katka 20 nebo Katka 80 (liší se maximálním provozním proudem) značky KMB (Obr. 4.6).



Obr. 4.6 Tyristorový spínací modul Katka 20 a Katka 80 [8]

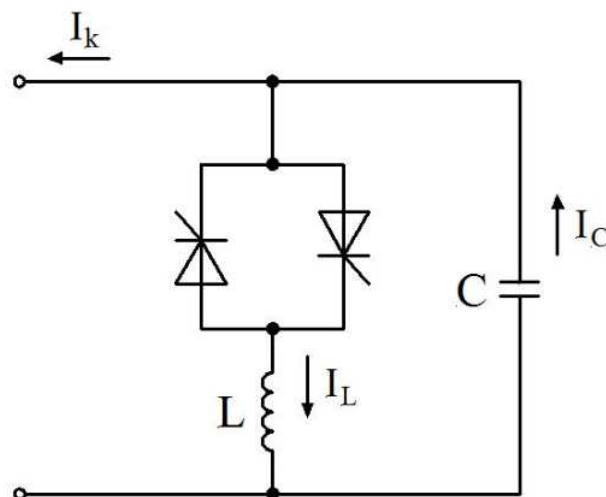
Jsou schopné provést až 20 regulačních zásahu za 1 sekundu. Zároveň musí být proto použit rychlejší regulátor jalového výkonu (např. Novar 1312). Ten zajistí spínání tak, že omezí přechodné děje při spínání na minimum. Kompenzačním kondenzátorům se zde většinou předřazují ochranné tlumivky.

Připínání a odepínání jednotlivých stupňů je podobné jako u kontaktního spínání, děje se tomu však podstatně rychleji. Další výhodou je dlouhá životnost spínačů (počet sepnutí a rozepnutí o řád vyšší než u kontaktního spínání) a omezené proudové a napěťové rušení zpět do sítě.

4.3 Plynulé řízení jalového výkonu

4.3.1 Plynule řízené kompenzační filtry

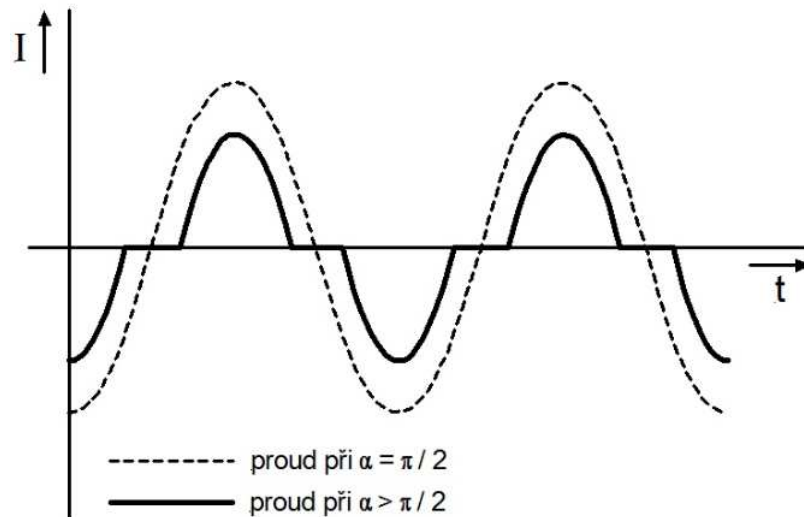
Plynule řízené kompenzační filtry mají schopnost snížit kompenzační výkon v okamžicích, že je nadbytek kapacitního výkonu kompenzačního zařízení. Toho lze dosáhnout plynulým řízením jalového proudu procházejícího tlumivkou. Plynulé řízení kapacitního proudu z důvodu přechodových jevů není možné. K řízení se používá fázově řízeného tyristorového spínače v antiparalelním zapojení. Ten umožňuje měnit induktivní proud tlumivky od nulové do plné hodnoty (omezené impedancí tlumivky). Základ plynulého řízení tvoří paralelní zapojení obvodu spínače s tlumivkou a kondenzátoru (Obr. 4.7).



Obr. 4.7 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru

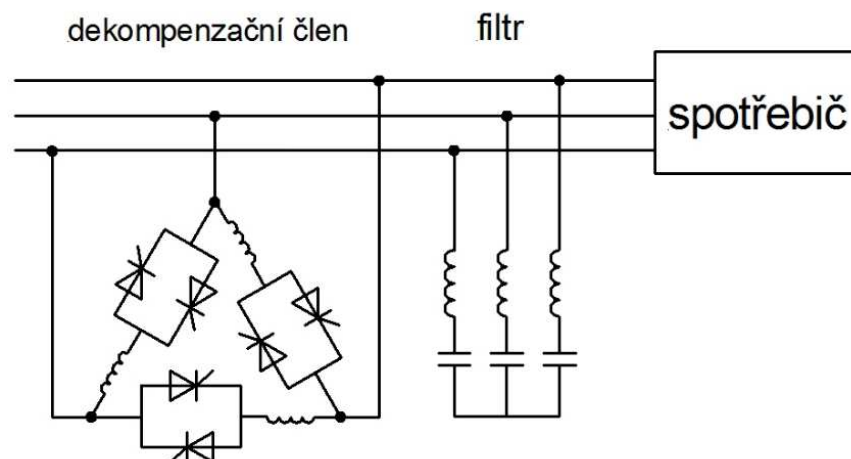
Zvýšením induktivního proudu tekoucího tlumivkou se zmenšuje dodávaný kompenzační proud a tím i kompenzační výkon. Takto používaná tlumivka je proto nazývána jako

dekompenzační. Fázové řízení je možné v intervalu $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$, kde α vyjadřuje fázový řídicí úhel. Při řízení $\alpha = 0 - \pi/2$, je proud maximální a sinusový. Při zvětšování vznikají na křivce proudu nulové prodlevy, při $\alpha = \pi$ je proud nulový. Průběh proudu pro různý úhel řízení ukazuje Obr. 4.8.



Obr. 4.8 Průběh proudu pro různý úhel řízení

Plynule řízené kompenzační filtry bývají řešeny trvale připojenými kompenzačními LC filtry a dekompenzačním členem (Obr. 4.9). Filtry jsou obvykle naladěny na charakteristické harmonické šestipulzních polovodičových měničů (tzn. na 5., 7., 11. a 13. harmonickou) a filtrují jak kompenzovanou soustavu, tak i komponenty harmonických vlastního kompenzátoru.



Obr. 4.9 Princip zapojení plynule řízeného kompenzátoru s dekompenzačním členem

Tato zařízení umožňují kromě rychlé a plynulé kompenzace a filtrace vyšších harmonických

také symetrizaci odběru a eliminaci flikru, který je způsoben rychlou změnou činného a jalového výkonu. Používají se pro kompenzaci tam, kde dochází k velmi rychlé změně kompenzačního výkonu, např. u bodových svářecích zařízení, na VN u pohonů válcovacích tratí nebo elektrických obloukových pecí.

4.3.2 Aktivní filtry

Mezi plynulé řízení kompenzačního výkonu patří aktivní filtry paralelní, sériové a kombinované, popsané v kapitole 3.2.4.

5. Vliv vyšších harmonických na provoz kondenzátorů

Nelineární spotřebiče, které při sinusovém napájení odebírají nesinusové proudy, lze považovat za zdroje vyšších harmonických proudů. Vnitřní impedance soustavy v místě připojení nelineárních spotřebičů k síti určuje, do jaké míry bude křivka napájecího napětí deformována jejich zpětným působením na síť. Tyto proudy se šíří dále soustavou. To má za následek vznik problémů jako je přetížení středního vodiče, přehřívání transformátorů, přetěžování kompenzačních kondenzátorů, vypínání jističů a ochran, poruchy počítačů a dalších citlivých spotřebičů. Jejich velikost je dána poměrem impedancí v různých uzlech rozvodu. Na impedancích vznikají harmonická napětí, která se superponují na křivku napájecího napětí a tím ovlivňují ostatní přístroje. Tyto vyšší harmonické proudy je nutno minimalizovat.

Impedance jsou ale pro různé frekvence harmonických jiné, protože kapacitní a indukční reaktance sítě jsou silně frekvenčně závislé. Pro základní harmonické má impedance sítě indukční charakter, pro některé vyšší harmonické může ale nabývat charakteru kapacitního. Vzhledem k přítomnosti induktivních i kapacitních prvků v síti mohou vznikat nebezpečné rezonanční jevy. Při vzniku rezonance na některé vyšší harmonické frekvenci může docházet k značnému proudovému přetěžování prvků sítě a deformaci napěťové křivky.

V obvodech s vysokým podílem nelineárních spotřebičů nestačí uvádět účinník $\cos \varphi$, ale je zaveden tzv. skutečný účinník, který v sobě zahrnuje i deformační výkon. Velmi často je používán anglický název PF – *Power Factor*. Skutečný účinník se značí Λ . Platí

$$\Lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad [-] \quad (5.1)$$

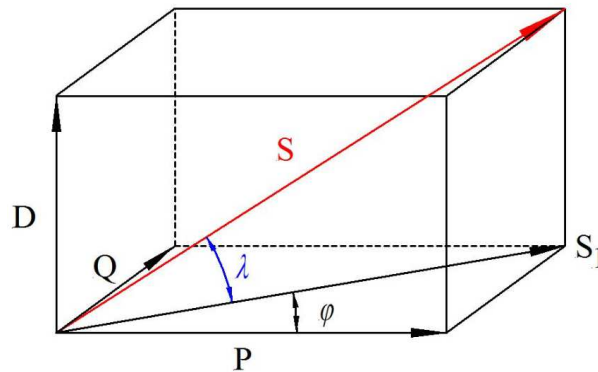
Pokud se uvažují vyšší harmonické proudy, vztah (1.5) přestává platit, dochází k nerovnosti a platí

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad [VA] \quad (5.2)$$

Deformační výkon, stejně jako jalový, představuje neúčinnou složku zdánlivého výkonu. Jeho důsledkem rostou ztráty ve vedení a klesá tím využitelnost sítě. Deformační výkon D používá jednotku voltampér deformační, značený VAd. Je definován vztahem

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 + Q^2} \quad [VAd] \quad (5.3)$$

Geometricky lze tento vztah vyjádřit pomocí tzv. výkonového kvádru na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Výkonový kvádr⁵

5.1 Sériová rezonance

Sériová rezonance může vzniknout mezi rozptylovou reaktancí napájecího transformátoru (a sítě) a kapacitní reaktancí kompenzačního kondenzátoru (baterie). Rezonance nastane při

rovnosti reaktance transformátoru a kompenzačního kondenzátoru $\omega L_T = \frac{1}{\omega C}$

kde

$$\omega L_T = \frac{U^2}{S_T} \cdot u_k \cdot \frac{f_h}{f_{50}} \quad (5.4)$$

a

$$\omega C = \frac{Q_C}{U^2} \cdot \frac{f_h}{f_{50}} \quad (5.5)$$

⁵ Obrázky v této kapitole jsou překresleny z [3][4]

Pak rezonanční frekvence obvodu f_r bude

$$f_r = f_{50} \cdot \sqrt{\frac{S_r}{Q_C \cdot u_k}} \text{ [Hz]} \quad (5.6)$$

Pokud rezonanční frekvence odpovídá některé harmonické složce napětí obsažené v síti nebo leží v její těsné blízkosti, představuje pro tuto harmonickou sériový obvod indukčnosti a kapacity tu nejmenší možnou impedanci. Pak kondenzátorem prochází největší možná hodnota proudu příslušné harmonické a dochází k jeho přetěžování (hovoří se o tzv. odsávání vyšší harmonické za sítě). To je spojeno s nárůstem oteplení, které často vede ke zničení kondenzátoru. Proto musí být kondenzátory bezpodmínečně blokovány. Blokování kondenzátoru proti odsávání harmonických se provádí předřazením ochranné tlumivky či hradicích členů před kondenzátor. Předřazením ochranné tlumivky vznikne chráněná (hrazená) kompenzace, kterou se více zabývá kapitola 5.4.

5.2 Paralelní rezonance

Paralelní rezonance může vzniknout mezi reaktancí sítě a kapacitou sítě nebo zátěže (kompenzační kondenzátory). Rezonance nastane při rovnosti admitance obou prvků

$$\omega \cdot C = \frac{1}{\omega \cdot L_S}$$

kde

$$\omega \cdot L_S = \frac{U^2}{S_k} \cdot \frac{f_h}{f_{50}} \quad (5.7)$$

a

$$\omega \cdot C = \frac{Q_C}{U^2} \cdot \frac{f_h}{f_{50}} \quad (5.8)$$

Potom rezonanční frekvence obvodu f_r bude

$$f_r = f_{50} \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_C}} \text{ [Hz]} \quad (5.9)$$

Při paralelní rezonanci dosahuje impedance obvodu nejvyšších hodnot. Pokud bude rezonanční frekvence shodná nebo blízká kmitočtu některé vyšší harmonické proudu emitovaného rušící zátěží, může napětí dané harmonické růst a výrazně deformovat napětí v místě připojení zátěže k síti. To může způsobit rušení ostatním připojeným odběratelům.

V případě, že by kompenzačnímu kondenzátoru byla předřazena ochranná tlumivka, měla by

být rezonanční frekvence vzniklého sériového LC obvodu nižší než nejmenší harmonická frekvence proudu rušící zátěže. Při splnění této podmínky představuje LC obvod pro všechny harmonické proudy obvod induktivního charakteru a nemůže tedy dojít k paralelní rezonanci s reaktancí sítě. Toto pravidlo je nutné dodržovat např. při připínání jednotlivých stupňů kompenzačních filtrů.

5.3 Kondenzátor v síti s vyššími harmonickými

Jak je již psáno v části 3.2.1, nechráněná kompenzace může být použita pouze v sítích s minimálním podílem nelineárních zátěží (10 – 15 % výkonu napájecího transformátoru). Důvodem je silná frekvenční závislost kapacitní reaktance kondenzátoru

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad [\Omega] \quad (5.10)$$

Ze vztahu (5.10) je zřejmé, že se zvyšujícím se kmitočtem klesá jeho reaktance. S tím souvisí reálná možnost přetížení kondenzátoru protékajícím proudem. Pokud se kondenzátor připojí do sítě, kde budou kromě základního kmitočtu i frekvence vyšších harmonických, bude pro ně představovat velmi nízkou reaktanci a celková efektivní hodnota protékajícího proudu vlivem harmonických vzroste. Tento proud nejen že bude přetěžovat samotný kondenzátor, ale i síť mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem.

Kvalitu kondenzátorů výrazně ovlivňují ztráty. Jsou složeny např. ze ztrát dielektrikem, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů atd. Jsou reprezentovány ztrátovým úhlem kondenzátoru $tg \delta$. Tangenta je závislá na teplotě (na rostoucí i klesající pod 0°C) a technologii výroby. Pro ztráty platí

$$P_z = Q_c \cdot tg \delta \quad [W/kVAr] \quad (5.11)$$

Pro neharmonický průběh je však třeba uvažovat ztráty od všech harmonických. Pro celkové ztráty pak platí vztah

$$P_z = \sum_{h=1}^{\infty} h \cdot Q_h \cdot tg \delta_h = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum_{h=1}^{\infty} h \cdot U_h^2 \cdot f_h \cdot tg \delta_h \quad [W/kVAr] \quad (5.12)$$

kde

h – řád harmonické

U_h – napětí harmonické

f_h – kmitočet harmonické

Ztráty kondenzátorů se dnes pohybují v rozmezí desetin W/kVAr. V nich jsou započítány i ztráty na vybíjecích odporech.

5.4 Chráněná (hrazená) kompenzace

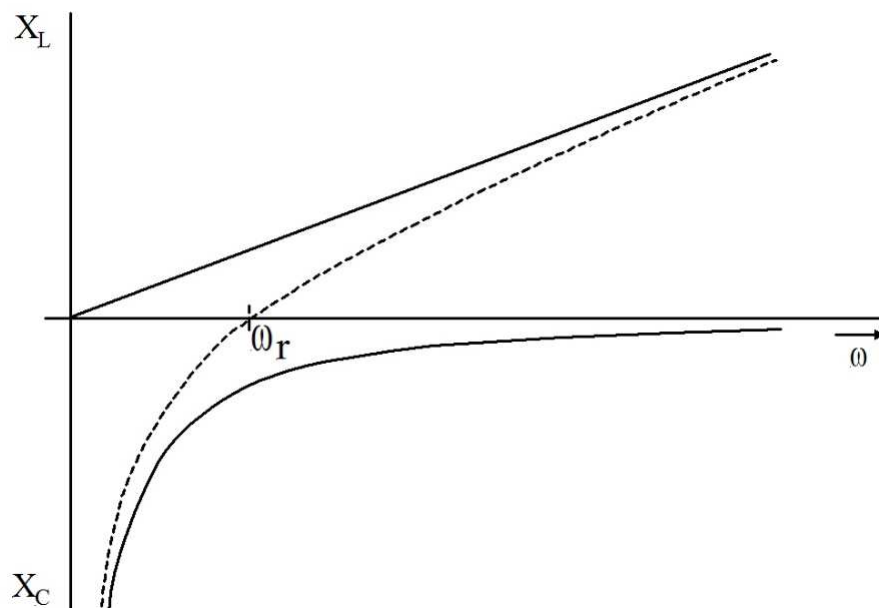
Indukčnost transformátoru spolu s kondenzátorem vytváří při jejich zapojování pro kompenzaci účinníku sériový rezonanční obvod (sériovou rezonancí se zabývá kapitola 5.1), který lze zakreslit jako sériové zapojení RLC článku, viz *Obr. 5.2*, kde rezistor představuje činný odpor vinutí transformátoru a vedení.



Obr. 5.2 RLC článek

Ten může být vybuzen do rezonančního stavu vyšším harmonickým proudem produkovaným nelineární zátěží a začne jím procházet vysoký proud, který bude přetěžovat kromě kompenzačního kondenzátoru i ostatní komponenty.

Chráněná (někdy také hrazená či laděná) kompenzace účinníku je metoda, která odstraňuje nebezpečí vzniku rezonančního stavu za pomoci posunutí rezonanční frekvence tak, aby byla nižší než frekvence nejnižší harmonické vyskytující se v síti (obvykle pod 200Hz). Toho se dosáhne tím, že se kondenzátoru předradí ochranná tlumivka (viz *Obr. 3.5*, kapitola 3.2.2). Vzniklý obvod je nadále rezonanční, ale jeho rezonanční frekvence je pod první existující harmonickou, je tzv. ztlumena. Tak bude eliminován vznik skutečného rezonančního stavu. Frekvenční charakteristika tohoto obvodu je na *Obr. 5.3*.



Obr. 5.3 Frekvenční charakteristika sériového rezonančního obvodu

Z charakteristiky je patrné, že pro frekvence nižší než rezonanční kmitočet f_r má obvod kapacitní charakter a tedy výrazné kompenzační účinky. Při frekvencích vyšších než rezonanční kmitočet má obvod charakter induktivní a vlivem rostoucí impedance dochází ke snižování vyšších harmonických proudů.

Rezonanční kmitočet f_r je možné spočítat dle Thomsonova vztahu.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (5.13)$$

Rezonanční obvod je charakterizován tzv. činitelem zatlumení, udávaný v poměrných jednotkách nebo procentech

$$p = \frac{1}{h_r^2} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5.14)$$

nebo

$$p = \frac{X_L}{X_C} \text{ [-]} \quad (5.15)$$

Řád harmonické h_r je dán poměrem rezonanční frekvence f_r a pracovní frekvence sítě f_n .

$$h_r = \frac{f_r}{f_n} \text{ [-]} \quad (5.16)$$

Pomocí činitele zatlumení se spočte reaktance tlumivky

$$X_L = p \cdot X_C \text{ [\Omega]} \quad (5.17)$$

Reaktance kompenzačního článku je při $f < f_r$ vždy nižší než výchozí reaktance kondenzátoru.

Reaktance celého kompenzačního článku je potom

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \text{ [\Omega]} \quad (5.18)$$

Skutečný výkon Q_{LC} kompenzačního článku je poměr jmenovitého sdruženého napětí sítě U_{Sn} a reaktance kompenzačního článku X_{LC}

$$Q_{LC} = \frac{U_{Sn}^2}{X_{LC}} \text{ [VAr]} \quad (5.19)$$

Vlivem předřazené tlumivce je na kondenzátoru vyšší napětí. U nás se kondenzátory většinou optimalizují pro napětí 440 V v síti se jmenovitým sdruženým napětím 400 V. Hodnota reaktance kondenzátoru se určí pomocí katalogové hodnoty kompenzačního výkonu Q_C a jmenovitého sdruženého napětí kondenzátoru U_{Cn} . Výpočet reaktance kondenzátoru vychází z Ohmova zákona.

$$X_C = \frac{U_{Cn}^2}{Q_C} [\Omega] \quad (5.20)$$

Skutečné napětí na kondenzátoru U_C je závislé na jmenovitém napětí sítě U_{Sn} a činiteli zatlumení p .

$$U_C = \frac{U_{Sn}}{1-p} [V] \quad (5.21)$$

Kondenzátor musí být volen pro vyšší jmenovité napětí než je napětí U_C . Výkon kondenzátoru se vlivem předřazení tlumivky sníží. Pro výkon celého kompenzačního článku platí

$$Q_{LC} = \left(\frac{U_{Sn}}{U_{Cn}} \right)^2 \cdot \frac{Q_C}{1-p} [VAr] \quad (5.22)$$

Výkon kondenzátoru při jiném fázovém napětí je

$$Q_C = \frac{U_C^2}{X_C} [VAr] \quad (5.23)$$

Výkon kondenzátoru při jiné frekvenci a napětí

$$Q_2 = Q_{Cn} \cdot \left(\frac{U_2}{U_{Cn}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_2}{f_{Cn}} \right) [VAr] \quad (5.24)$$

kde

Q_2 - výkon kondenzátoru při napětí U_2 a frekvenci f_2

Q_{Cn} - jmenovitý výkon kondenzátoru

U_{Cn} - jmenovité napětí kondenzátoru

f_{Cn} - jmenovitý kmitočet kondenzátoru

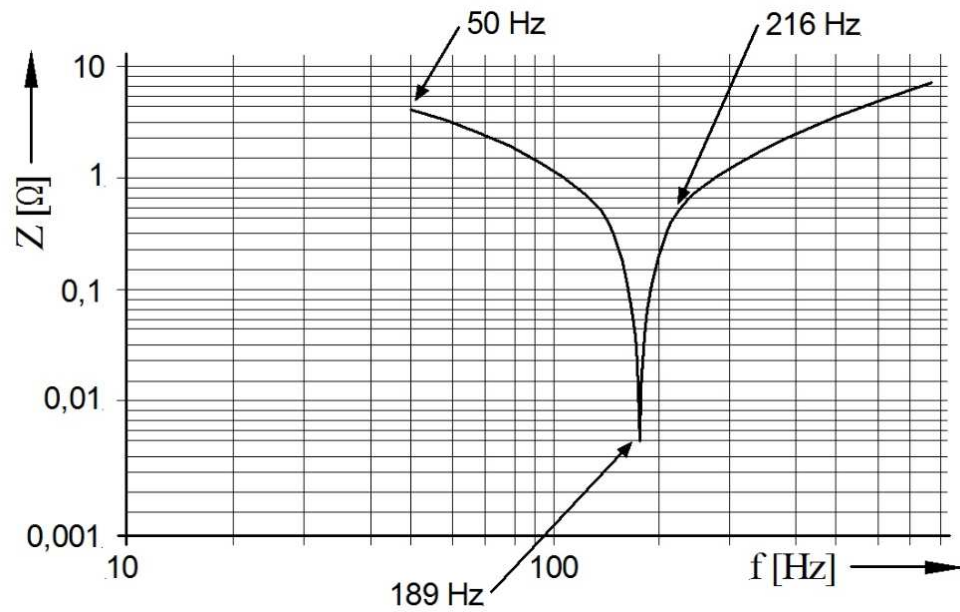
5.4.1 Kompenzační ochranná tlumivka

Jak bylo již psáno výše, ochranná tlumivka musí být navržena tak, aby byl rezonanční kmitočet pod nejnižší frekvencí vyšší harmonické vyskytující se v síti (obvykle pod 200Hz).

Nejpoužívanější frekvencí je 189Hz, která odpovídá činiteli zatlumení $p=7\%$. Dalšími standardními používanými činiteli zatlumení jsou $p=5,67\%$ pro frekvenci 210Hz a $p=14\%$ pro frekvenci 134Hz (jejich použití závisí na kmitočtu HDO v oblasti instalované kompenzace).

Tím se dosáhne omezení rezonančních jevů. Dalšími důležitými funkcemi tlumivky v chráněné kompenzaci jsou omezení amplitudy proudových rázů při spínání (nabíjecí proud kondenzátorů), ochrana kondenzátorů před přetížením nadproudy vyšších harmonických a

$p=5\%$. Rovněž nesmí docházet k rezonanci signálu HDO, která by způsobila nepovolené převýšení signálu a z toho vyplývající problémy v elektrické síti.



Obr. 5.5 Frekvenční charakteristika chráněné kompenzace s činitelem zatlumení 7%

6. Návrh chráněné kompenzační jednotky

6.1 Stručný popis podniku

Jedná se o vertikální betonárnu stojící nedaleko Horoměřic u Prahy s maximálním ověřeným hodinovým výkonem až 80m³ čerstvého betonu (2m³ na výrobní dávku). Celá výroba je plně automatizována – na namíchání výrobní dávky stačí 1 člověk. Možnosti dávkování 6 frakcí kameniva, 4 druhů cementu nebo popílku a až 6 druhů přísad. Betonárna je zateplena pro zimní období a vybavena zařízením pro ohřev záměsové vody. Součástí betonárny je i recyklační zařízení pro zpracování zbytkového betonu [13].



Obr. 6.1 Betonárna, Horoměřice u Prahy [13]

Podnik je připojen do distribuční sítě 22kV jedním olejovým transformátorem o výkonu 250kVA a převodem 22/0,4kV.

6.2 Popis technologie podniku

Tato kapitola je věnována stručnému popisu technologie betonárny. Jde se o dvoustupňovou betonárnu vertikální konstrukce s dávkováním jednotlivých komponentů ze zásobníků, které jsou umístěné mimo mísící centrum. Některé části betonárny jsou zobrazeny v Příloze č.2.

Znalost režimu provozu betonárny je nutná pro posouzení očekávaného příkonu (výpočtového zatížení), z něhož se potom vychází při výpočtu potřebného kompenzačního výkonu a jednotlivých kompenzačních stupňů.

6.2.1 Uložení kameniva

Kruhový zásobník kameniva slouží k uložení kameniva a písku v jednotlivých frakcích. Dávkování je prováděno do skipu pomocí pneumaticky ovládaných výpustí na dně zásobníku. Výpusti jednotlivých frakcí jsou opatřeny příloženými vibračními jednotkami, které

napomáhají tomu, aby nedošlo k ucpání výpusti. Doprava kameniva do zásobníku je zabezpečena pomocí kapsového dopravníku (elevátoru) a soustavy vibračních podavačů z podúrovňové výsyvky kameniva. Dělení kameniva do jednotlivých frakcí zásobníku se provádí ve vrchlíku tzv. otočným rozdělovačem frakcí (ORF). Zásobník má objem cca 1000m³.



Obr. 6.2 Příložný vibrátor [23]

6.2.2 Cementové hospodářství

Zahrnuje čtyři cementová sila, ve kterých je uložen cement nebo speciální příměsi (popílek). Z těchto sil je cement za pomoci šnekových dopravníků dávkován do váhy cementu, umístěné nad míchačkou. Rychlejšímu vyprazdňování obsahu vážící nádoby do míchačky napomáhá příložný vibrátor. Samotná sila jsou vybavena vibračními jednotkami, optickou a akustickou signalizací a cementovými filtry. Doprava cementu obvykle probíhá pneumaticky plnicím potrubím autocisterny.

6.2.3 Vodní hospodářství

Nadávkování potřebného množství vody obsluhuje váha vody. V případě vážení kalové i čisté vody vážení probíhá postupně, součtově. Kalová voda pochází z recyklačního zařízení, popisovaného v kapitole (6.2.6). Doprava kalové vody do míchačky je přes klapku samospádem, čistá voda je do míchačky vstřikována pomocí trysek umístěných v míchačce. Pro dávkování kalové vody nelze použít trysky v míchačce, protože kalová voda obsahuje nečistoty, které by mohly trysky ucpat. K tomu, aby čistá voda mohla být vstřikována do míchačky, slouží čerpadlo umístěné na míchačce.

Veškeré vážení (voda, cement, kamenivo) je prováděno za pomoci tenzometrických snímačů.

6.2.4 Skip

Skip je určen pro navážení a dopravu naváženého kameniva do míchačky. Skip čeká pod zásobníkem kameniva, zavěšený na tenzometrických snímačích. Zde probíhá postupně

součtové vážení jednotlivých frakcí kameniva. Jakmile je kamenivo naváženo, vyjede do horní polohy k míchačce, kde se koš vyprazdňuje přes spodní uzávěr, který zároveň utěsňuje plnicí otvor míchačky (může zde však čekat až na příkaz k vyprázdnění). Po vyprázdnění se vrací do počáteční pozice pod váhu kameniva a cyklus se opakuje. Pohyb skipu je jistěn bezdotykovými koncovými spínači. Z důvodu bezpečnosti a plynulosti pohybu (pomalý rozjezd v krajních polohách, rychlý pohyb ve střední části dráhy) je řízen pomocí frekvenčního měniče.

6.2.5 Mísící jádro [14][15]

Míchání betonové směsi zajišťuje dvouhřídelová míchačka, umístěná v mísícím centru. Dvouhřídelový systém míchání spočívá ve dvou paralelních hřídelích s rameny a lopatkami, které se pohybují protiproudě. Ramena s lopatkami vytvářejí trojrozměrný míchací efekt. K míchání dochází především uprostřed prostoru míchačky, což má příznivý vliv na opotřebení otěrových dílů míchačky. Míchačka je vybavena hydraulicky ovládaným výpustným uzávěrem pro transportbeton, opatřeným vibrační jednotkou. Pohon míchačky je zajištěn dvěma 37kW motory. Pro kontrolu kvality betonové směsi je na dně míchacího bubnu míchačky umístěna mikrovlnná vlhkostní sonda. Pomocí ní je zjišťováno množství záměsové vody (tj. voda v kamenivu, volně přidávaná voda, voda v přísadách) v betonu. V případě potřeby je voda dodávána. Konzistence míchaného betonu je měřena tzv. konzistoměrem, pracujícím na principu měření příkonu míchačky.

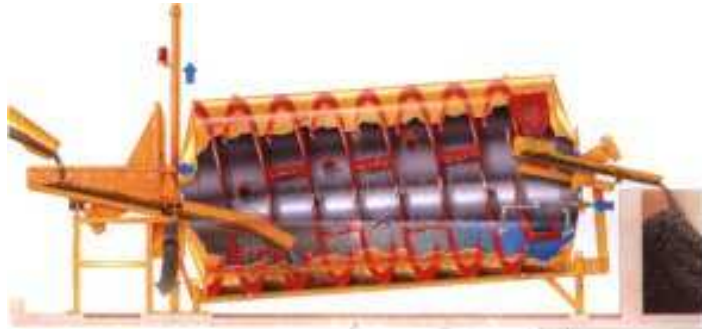


Obr. 6.3 Dvouhřídelová míchačka [14]

6.2.6 Recyklační zařízení

Technologické zařízení, tzv. recykling, slouží k rozplavování zbytků betonu z betonárny a dopravních prostředků. Za pomoci tohoto zařízení je veškerá voda i kamenivo recyklováno a tím se chrání životní prostředí. Vyprané kamenivo se ukládá na skládku, ze které je v případě potřeby dopravováno zpět do betonárny. Kalová voda je odváděna do soustavy sedimentačních jímek, vybavenými čeridlem kalové vody (vrtule zabraňující nevhodné

sedimentaci), dávkovacími čerpadly do betonárny a automixů a dalšími nutnými doplňky. Voda je z jímek čerpána do váhy vody. Koncepce zařízení je řešena pro celoroční provoz. Logika spouštění čeridla je zcela autonomní, nezávislá na provozu betonárny.



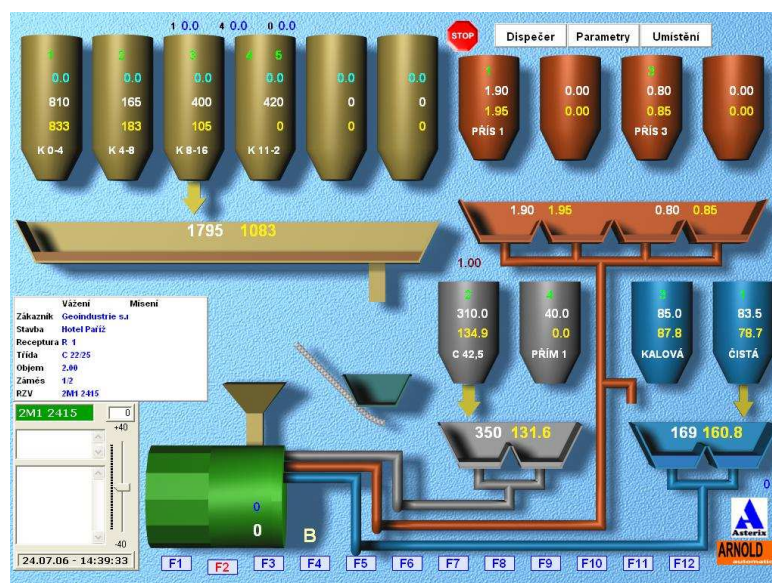
Obr. 6.4 Recyklační zařízení-šnekový vymývač [16]

6.2.7 Rozvod stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch k jednotlivým pneumatickým prvkům umístěným v betonárně zajišťuje kompresor v kombinaci s expanzní nádrží.

6.2.8 Řídicí systém betonárny

Veškeré měřicí a řídicí vybavení je soustředěno ve velíně, tvořeném separovanou buňkou. Zde mají pracoviště pracovníci obsluhy a řídicí počítače. Pro řízení betonárny je použit centralizovaný systém firmy Asterix. Celý proces míchání je řízen automaticky, obsluha pouze zadá požadovanou recepturu betonové směsi a množství. Teoretický výkon betonárny je stanoven recepturou směsi, dobou míchání a kontinuálností odběru betonové směsi.



Obr. 6.5 Obslužný software betonárny ATX B300 [15]

6.2.9 Proces výroby betonové směsi

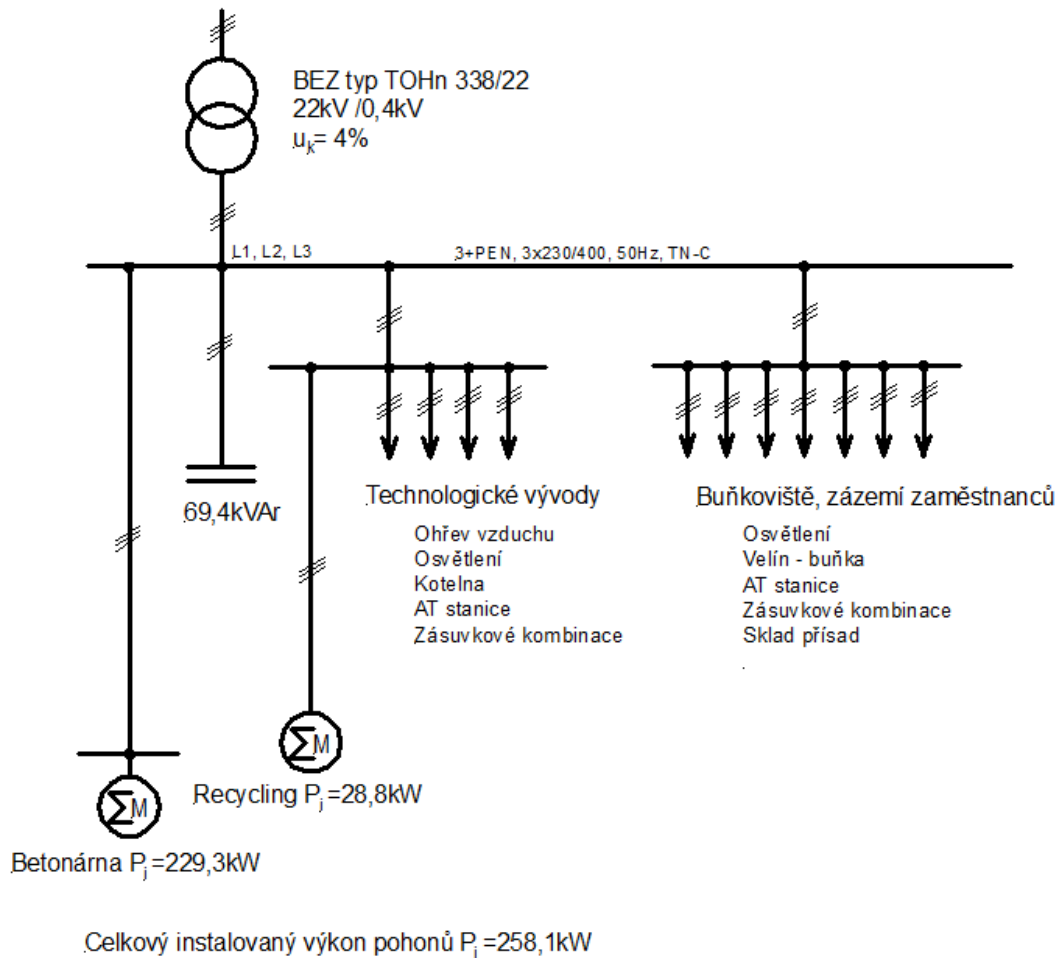
Míchací cyklus míchacího centra je postupná záležitost. Po zadání požadované receptury a množství betonu řídicí systém předá pokyn na navážení kameniva (a písku – dle receptu) do skipu, který čeká ve své spodní poloze. Současně dochází pomocí šnekových dopravníků k navážení požadovaného množství cementu do váhy cementu a navážení požadovaného množství vody do váhy vody za pomoci čerpadel. Navážená voda obsahuje jak vodu kalovou, tak i čistou. V případě, že receptura obsahuje přísady, dochází k čerpání přísad do váhy přísad. Poté a to skoro současně s navažováním se spouští motory vlastní míchačky - nelze sypat kamenivo a přísady do stojící míchačky. Po navážení dochází k vyjetí skipu do horní polohy a vysypání kameniva a ostatních navážených přísad do míchačky. Centrální kompresor zásobuje tlakovým vzduchem uzávěry komor zásobníku, spodní uzávěry míchačky a uzávěry všech vah. Do celého procesu se autonomně zapíná pohon vrtule recyklačního zařízení, současně může docházet k vymývání autodomývačů nebo plnění zásobníku kameniva pomocí elevátoru. Délka celého procesu je závislá na receptuře a množství dávky a trvá 60-90 sekund. V případě kontinuálního odběru po vysypání všech frakcí a přísad do míchačky dochází za současněho míchání k dalšímu navažování. Tím se celý proces urychlí.

6.3 Skladba a zapojení spotřebičů

Většinu spotřeby tvoří asynchronní pohony s kotvou nakrátko (viz *Příloha č.3*). Ty jsou bezpochyby nejrozšířenějším pohonem v oboru pracovních strojů díky své vysoké účinnosti a nízké ceně. Zapojení pohonů je na *Obr. 6.6 Zjednodušený náčrt zapojení rozvodů betonárny*. Nevýhodou je obtížnější řízení otáček, musí být použito frekvenčního měniče.

Součástí pohonů jsou také vibrační jednotky, sloužící jako budiče kmitů. Ty jsou v betonárnách hojně využívány pro oklep násypek a dopravu sypkých materiálů. Tyto vibrátory nejsou nic jiného než elektromotory, které mají na obou koncích hřídele umístěny rotující nevyvážky. Nastavení odstředivé síly lze v klidu přenastavením nevyvážek nebo za chodu použitím frekvenčního měniče.

V seznamu je také uveden pohon skipu, jehož otáčky jsou regulovány pomocí frekvenčního měniče. Ten tvoří nelineární zátěž a je tak možným zdrojem vyšších harmonických.



Obr. 6.6 Zjednodušený náčrt zapojení rozvodů betonárny

6.4 Návrh kompenzačního rozvaděče

Jak již bylo psáno, pohon skipu, regulovaný přes frekvenční měnič, představuje nelineární zátěž, tedy zdroj vyšších harmonických. Všeobecným pravidlem je dáno, že nechráněné kompenzační sekce lze použít v takové síti, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů činí cca 10 až 15 % napájecího transformátoru. Tato podmínka je zde splněna, nicméně kvůli problému se stávajícím nechráněným kompenzátozem a jeho negativnímu vlivu na centrální elektroniku tenzometrických snímačů se bude návrh jednoznačně věnovat centrální chráněné kompenzaci. Další důvod návrhu nové kompenzace je ten, že stávající kompenzace byla navržena na provoz bez recyklačního zařízení. To bylo dodáno později při modernizaci betonárny, kompenzační zařízení se však neupravovalo. Stávající kompenzace je sice dostatečná z hlediska výkonu (výkon 69,4 kVAr, stupně 3,15+6,25+10+12,5+12,5+25), nejmenší stupeň 3,15kVAr je ale špatně zvolen, protože při chodu 5,5kW motoru čeracího zařízení v noci pravděpodobně dochází k překompenzování, viz. Příloha č. 1 – Graf hodnot $\frac{1}{4}$ hodinových maxim.

Je třeba připomenout, že správnému a optimálnímu návrhu chráněné kompenzace by měla předcházet analýza sítě pro zjištění úrovně harmonického rušení. Tato práce předpokládá, že je zde rušení jak od samotného kompenzačního zařízení, tak od frekvenčního měniče skipu.

Základním parametrem pro návrh hrazeného kompenzačního zařízení je činitel zatlumení p . Nainstalovaný frekvenční měnič je zdrojem harmonických proudů, zejména páté a sedmé. Všem kondenzátorům bude nutné předřadit ochrannou tlumivku, naladěnou již proti nižší z těchto harmonických, tedy na pátou harmonickou. Harmonické 5.řádu odpovídá frekvence 250Hz.

Určení činitele zatlumení musí brát ohled na frekvenci signálu HDO. Betonárna je postavená v oblasti, která používá signál HDO o kmitočtu 216,6Hz. Rezonanční frekvence musí být proto zvolena s dostatečným odstupem nižší než 216,66Hz. V praxi se jako vhodná rezonanční frekvence využívá hodnoty $f_r=189\text{Hz}$, což po dosazení do vztahu (5.16) a (5.14) odpovídá činiteli zatlumení $p=7\%$. S tímto činitelem zatlumení bude celá chráněná kompenzace navrhována.

6.4.1 Kompenzační výkon

V Příloze č.3 je seznam všech pohonů betonárny. Součtem všech jmenovitých výkonů pohonů získáme instalovaný výkon P_i .

Součinitel náročnosti se vypočte dle vztahu

$$\beta = \frac{P_{\max}}{P_i} [-] \quad (6.1)$$

kde

P_{\max} - je příkon určený z maximálního odběru elektrické energie za jednu hodinu v období největšího odběru v roce

P_i - je instalovaný výkon [kW]

Pro provoz betonárny byl dle normy ČSN 34 1610 *Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách* vybrán činitel soudobosti $\beta=0,57$ (tato hodnota přibližně odpovídá i naměřeným hodnotám odběru, které byly k dispozici, viz. Příloha č.1)

Z instalovaného výkonu P_i a činitele soudobosti β vypočteme výpočtové zatížení P_p .

$$P_p = P_i \cdot \beta = 258,1 \cdot 0,57 = 147,12 \text{ kW}$$

Kompenzační výkon bude počítán dle vztahu (2.1) na cílovou hodnotu účinníku $\cos \varphi_k=0,98$, na kterou je kompenzován i v současnosti. Střední účinník před kompenzací je vypočítán z celkového odebíraného činného a jalového výkonu (příkonu) a má hodnotu $\cos \varphi=0,88$. To je

však účinník teoretický, který počítá s plným zatížením všech pohonů. Je třeba brát v úvahu, že některé pohony nemusí běžet na plný výkon. Ten je závislý hlavně na objemu výrobní dávky betonu. Při nižším využití pohonu mírně klesá i jeho účinník. Výsledný střední účinník před kompenzací bude počítán z uměle snížené hodnoty $\cos \varphi = 0,85$ (tato hodnota je dána také aritmetickým průměrem účinníků všech pohonů a odpovídá i výpočtu účinníku před kompenzací ze současné kompenzace dle vztahu 2.1).

$$Q_C = P \cdot (tg \varphi - tg \varphi_k) = 147,12 \cdot (0,62 - 0,203) = 61,34 \text{ kVAr}$$

Z důvodu jisté rezervy jalového výkonu se vypočtený výkon doporučuje navýšit přibližně o 5-10% [1]. Výsledná hodnota kompenzační baterie tedy bude o výkonu cca 67 kVAr. Tato hodnota by však platila v případě nechráněné kompenzace. Vztah (5.22) říká, že při předřazení ochranné tlumivky kompenzační výkon kondenzátoru klesá. To je nutné zohlednit při volbě jednotlivých stupňů, a proto v případě chráněné kompenzace bude muset být kompenzační výkon vyšší.

Dále je nutné určit jednotlivé velikosti kompenzačních stupňů. Kritériem pro stanovení kompenzačního výkonu prvního, nejmenšího stupně, je velikost příkonu nejmenšího pohonu. Ostatní velikosti se v praxi většinou volí jako násobky nejmenší hodnoty kondenzátoru. Jedná se tu o regulaci stupňovou, nikoliv plynulou. Je nutné počítat s tím, že jeden kondenzátor je schopen vykompenzovat jeden pohon nebo skupinu pohonů, a že výkony kondenzátorů se při kompenzaci sčítají. Hodnotou výkonu nejmenšího stupně je dána určitá jemnost kompenzace.

6.4.2 Kondenzátorová baterie a ochranné tlumivky

Je známo, že pro kompenzaci asynchronního motoru je potřebný kompenzační výkon kondenzátoru hodnoty asi 30-40% příkonu elektromotoru [1]. Nejmenší kompenzační výkon je zvolen s ohledem na pohon čeridla recyklačního zařízení o jmenovitém výkonu 5,5 kW, které se autonomně spouští i v noci. Za předpokladu, že pohon běží naplno, bude pro jeho kompenzaci na hodnotu účinníku $\cos \varphi_k = 0,98$ potřeba výkonu 2,16 kVAr, spočteného dle vztahu (2.1), kde za P se dosadí příkon motoru (tedy poměr výkonu a účinnosti stroje).

Pro návrh budou uvažovány kompenzační kondenzátory českého výrobce ZEZ-Silko a tlumivky stejného výrobce. Dle vztahu (5.21) se spočte sdružená hodnota skutečného napětí na kondenzátoru, které je vlivem předřazené ochranné tlumivky vyšší, než síťové

$$U_C = \frac{U_{Sn}}{1-p} = \frac{400}{1-0,07} = 430,1 \text{ V}$$

Z katalogu produktů [5] budou vybrány kondenzátory pro jmenovité napětí $U_{Cn} = 440 \text{ V}$.

Požadovaný výkon prvního stupně volím 2,16kVAr. V případě chráněné kompenzace je tento výkon roven výkonu celého kompenzačního článku (ochranná tlumivka a kondenzátor). Výpočet začíná výpočtem proudu procházejícího kondenzátorem.

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_{sn}} = \frac{2,16 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 3,12 \text{ A}$$

Nyní je možné pomocí Ohmova zákona určit kapacitu kondenzátoru (v jedné fázi).

$$C = \frac{I_C}{\frac{U_C}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot 3} = \frac{3,12}{\frac{430,1}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3} = 13,3 \mu\text{F}$$

Three-Phase Capacitors 440 V AC, 50 Hz, MKP dry, delta connection

Třífázové kondenzátory 440 V AC, 50 Hz, MKP suché, zapojení do trojúhelníku

Type Typ	Output Výkon Q_N [kvar]	Current Proud I_N [A]	Capacitance Kapacita C_N μ	Dimensions Rozměry \varnothing D x H [mm]	Weight Hmotnost [kg]	Protection degree Stupeň krytí
CSADG 1-0,44/1	1,00	1,3	3 x 5,5	85 x 175	0,6	IP20
CSADG 1-0,44/1,5	1,50	2,0	3 x 8,2	85 x 175	0,6	IP20
CSADG 1-0,44/2	2,00	2,6	3 x 11,0	85 x 175	0,6	IP20
CSADG 1-0,44/2,5	2,50	3,3	3 x 13,7	85 x 175	0,6	IP20
CSADG 1-0,44/3,15	3,15	4,1	3 x 17,3	85 x 175	0,7	IP20
CSADG 1-0,44/4	4,00	5,2	3 x 21,9	85 x 175	0,7	IP20
CSADG 1-0,44/5	5,00	6,6	3 x 27,4	85 x 175	0,8	IP20
CSADG 1-0,44/6,25	6,25	8,2	3 x 34,3	85 x 175	0,9	IP20
CSADG 1-0,44/8	8,00	10,5	3 x 43,8	85 x 245	0,9	IP20
CSADG 1-0,44/10	10,00	13,1	3 x 54,8	85 x 245	1,0	IP20
CSADG 1-0,44/12,5	12,50	16,4	3 x 68,5	85 x 245	1,2	IP20
CSADG 1-0,44/15	15,00	19,7	3 x 82,2	85 x 245	1,3	IP20
CSADG 1-0,44/20	20,00	26,2	3 x 109,6	110 x 245	1,9	IP20
CSADG 1-0,44/25	25,00	32,8	3 x 137,0	110 x 245	2,1	IP20
CSADG 3-0,44/30	30,00	39,4	3 x 164,4	136 x 220	3,3	IP20

Obr. 6.7 Hodnoty kompenzačních kondenzátorů [5]

V katalogu výrobce [5] zvolím nejbližší vyšší hodnotu kapacity a určím kondenzátor. Nejvhodnější je kondenzátor s hodnotou kapacity 3x13,7 μ F o výkonu 2,5kVAr. Abych mohl zjistit, zda kondenzátor vyhovuje svým výkonem při předřazení ochranné tlumivky, je potřeba spočítat jeho reaktanci.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 13,7 \cdot 10^{-6}} = 77,45 \Omega$$

Následně se ze vztahu (5.18) vypočte reaktance celého kompenzačního článku. Za hodnotu činitele ztlumení p se dosadí hodnota 0,07.

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C = (1 - 0,07) \cdot 77,45 = 72,03 \Omega$$

Nyní lze dle vztahu (5.19) spočítat skutečný výkon kompenzačního článku se zvolenou hodnotou kondenzátoru.

$$Q_{LC} = \frac{U_{Sn}^2}{X_{LC}} = \frac{400^2}{72,03} = 2,22 \text{ kVAr}$$

Výsledný kompenzační výkon bloku kondenzátor-tlumivka je o malou část vyšší než požadovaný výkon, nicméně to není na závadu. S tímto výkonem se pohon čeridla recyklačního zařízení vykompenzuje na hodnotu o něco nižší, než $\cos \varphi_k = 0,985$.

Reaktance tlumivky se spočte dle vzorce (5.17).

$$X_L = p \cdot X_C = 0,07 \cdot 96,5 = 5,422 \Omega$$

Z reaktance tlumivky je již možné určit výslednou indukčnost tlumivky.

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{5,422}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 17,26 \text{ mH}$$

Z katalogu výrobce [18] se vybere vhodná hodnota indukčnosti tlumivky.

Type Typ	Power of capacitor-reactor Výkon bloku kondenzátor - tlumivka Q_{Komp} [kvar]	Power of capacitor at 440 V Výkon kondenzátoru při 440 V Q_{Kond} [kvar]	Capacitance of capacitor Kapacita kondenzátoru do trojúhelníku C_{Kond} [μF]	Inductance of reactor Indukčnost tlumivky L_a [mH]	Rated current Jmenovitý kapacitní proud $I_N = I_{1N}$ [A]
ZEZ-CuK 01-189/400/440	0,9	1	3 x 5,5	43,129	1,28
ZEZ-CuK 02-189/400/440	1,8	2	3 x 11,0	21,565	2,57
ZEZ-CuK 02,5-189/400/440	2,2	2,5	3 x 13,7	17,252	3,21
ZEZ-CuK 03,15-189/400/440	2,8	3,15	3 x 17,3	13,694	4,04
ZEZ-CuK 05-189/400/440	4,4	5	3 x 27,4	8,627	6,41
ZEZ-CuK 06,25-189/400/440	5,6	6,25	3 x 34,3	6,902	8,02
ZEZ-CuK 07,5-189/400/440	6,7	7,5	3 x 41,1	5,751	9,62
ZEZ-CuK 10-189/400/440	8,9	10	3 x 54,8	4,319	12,8
ZEZ-CuK 12,5-189/400/440	11,1	12,5	3 x 68,5	3,455	16,0
ZEZ-CuK 15-189/400/440	13,3	15	3 x 82,2	2,875	19,2
ZEZ-CuK 20-189/400/440	17,8	20	3 x 109,6	2,169	25,6
ZEZ-CuK 25-189/400/440	22,2	25	3 x 137,0	1,727	32,1
ZEZ-CuK 28,1-189/400/440	25,0	28,1	3 x 154,0	1,535	36,0

Obr. 6.8 Hodnoty ochranných tlumivek [18]

V současnosti se v katalozích tlumivek většinou nachází údaj o velikosti výkonu Q_{LC} celého kompenzačního článku a bývá přiřazen příslušný kondenzátor a tlumivka. Nemusí se tak složité přepočítávat hodnoty uvedené výše.

Pro ostatní stupně byly hodnoty kondenzátorů a tlumivek zvoleny takto:

Tab. 6.1 Hodnoty kondenzátorů a tlumivek jednotlivých stupňů

Stupeň	Výkon 3f kondenzátoru Q_C [kVAr]	Indukčnost tlumivky L_a [mH]	Výkon bloku Q_{LC} [kVAr]
1	2,5	17,252	2,2
2	5	8,627	4,4
3	10	4,319	8,9
4	10	4,319	8,9
5	10	4,319	8,9
6	20	2,169	17,8
7	20	2,169	17,8

Z hodnot kompenzačních stupňů vyplývá váha regulátoru 1:2:4:4:4:8:8. Zvolené výkony kondenzátorů a jejich kombinace počítají se situací, že v dané chvíli poběží pouze jeden konkrétní pohon. Reálná situace nastává při spouštění již zmíněného motoru čeridla v noci, nebo pokud se nemíchá výrobní dávka betonu a zaměstnanec vymývá autodomývač při puštění šnekovém vymývači. Taktéž je možná situace doplňování kameniva do zásobníku pomocí elevátoru při nečinnosti betonárny, např. při polední přestávce zaměstnanců. V dané chvíli se jedná o jistou formu vzdálené individuální kompenzace.

Celkový kompenzační výkon 3f kondenzátorů je 77,5kVAr, s předřazenou tlumivkou činí kompenzační výkon 68,9kVAr.

6.4.3 Regulátor jalového výkonu a měřící transformátor proudu [17]

K regulaci jalového výkonu bude použit regulátor Novar 1007. Jeho výhodou je kompaktní provedení, příznivá cena a zvýšená citlivost (0,02A) oproti jeho předchůdci (Novar 5). Regulátor má k dispozici 8 výstupních relé, z nichž nejvyšší 2 výstupy lze nastavit jako alarmové nebo pro spínání ventilátoru, eventuálně topení (regulátor disponuje zabudovaným čidlem teploty). Mezi jeho přednosti patří velký rozsah, přesná funkce měření a regulace i v podmínkách zkreslení napětí i proudového průběhu vyššími harmonickými složkami. Regulátor taktéž umožňuje vyhodnocení úrovně harmonického zkreslení (THD) a jednotlivých harmonických složek napětí i proudu až do 19. řádu a vyhodnocení úrovně harmonického proudového zatížení kompenzačních kondenzátorů.

Po připojení kompenzačních stupňů regulátor automaticky rozpozná jejich velikosti. V průběhu regulačního procesu dochází k průběžné kontrole regulačních stupňů a zároveň k zpřesňování rozpoznávaných hodnot. V případě opakovaného zjištění závady regulátor dočasně vyřadí vadný stupeň z regulace (současně je možná aktivace alarmu). Dočasně odstavené stupně jsou periodicky přezkušovány po pěti dnech a při úspěšném testu (např. výměně spálené pojistky stupně) jsou znovu zařazeny do kompenzačního procesu.

Regulátor je panelového provedení, s rozměry 96 x 96 mm. Dle specifikace výrobce se jako odpojovací prvek jištění doporučuje jistič o maximální jmenovité hodnotě 10A. Regulátor Novar 1007 bude jištěn pojistkovým odpínačem vložek s pojistkou 10A. Poslední reléový výstup bude sloužit ve spojení s vestavěným teplotním čidlem ke spínání ventilátoru.

Měřící transformátor proudu, typ TP23 250/5 s dělitelným jádrem (viz. Obr.4.2), bude umístěn za hlavním vypínačem v trafostanici na vodiči fáze L1. Současně musí být kvůli

přesnosti měření zajištěno napájení regulátoru ze stejné fáze. Připojení k regulátoru bude provedeno vodičem CYKY 2Ax2,5mm².



Obr. 6.9 Regulátor jalového výkonu Novar 1007 [17]

6.4.4 Kompenzační stykače

Ke spínání jednotlivých stupňů budou použity kondenzátorové stykače řady BFK značky LOVATO. Výběr vhodného stykače je dle spínaného výkonu kompenzačního článku, napětí a jmenovitého proudu. Jmenovitý proud, obvykle značený I_e , je však závislý na okolní teplotě prostředí. V katalogích jsou obvykle udány hodnoty proudu při teplotě 50°C a 60°C. K jistění je třeba stanovit pojistky s pomalou charakteristikou (gG) s hodnotou 1,6 až 2,5 násobku jmenovitého proudu.



Obr. 6.10 Kondenzátorový stykač BFK LOVATO [19]

Stykače budou použity pro hodnotu napětí 440V. Pro první a druhý stupeň bude vybrán stykač BFK09, který je určen pro spínání výkonu až 9kVAr (při 440V a teplotě okolí maximálně 50°C). Jeho jmenovitá hodnota proudu je 12A.

Objednávací kód	Maximální pracovní výkon 50/60Hz ①				Z	Ba- le- ní ks	Hmot- nost [kg]
	240V	400V	440V	690V			
	[kvar]	[kvar]	[kvar]	[kvar]			
AC CÍVKA.							
BFK09 10A ②	4.5	7.5	9	10	1	10	0.413
BFK12 10A ②	7	12.5	14	16	1	10	0.413
BFK18 10A ②	9	15	17	20	1	10	0.413
BFK26 00A ②	11	20	22	22	-	10	0.472
BFK32 00A ②	14	25	27.5	30	-	10	0.472
BFK38 00 A ②	17	30	33	36	-	10	0.472
11 BF50K 00 ②	22	38	41	46	-	5	1.440
11 BF65K 00 ②	26	45	50	56	-	5	1.470
11 BF70K 00 ②	30	50	56	65	-	5	1.470
11 BF80K 00 ②	34	60	65	70	-	5	1.470

Pracovní parametry		
Typ	Jmenovitý proud	Pojistka gG
	[A]	[A]
BFK09	12	16
BFK12	18	25
BFK18	23	40
BFK26	30	40
BFK32	36	63
BF38K	43	63
BF50K	58	80
BF65K	70	100
BF70K	75	125
BF80K	90	125

Obr. 6.11 Část katalogu stykačů BFK značky Lovato [17]

Tento stykač bude pro druhý stupeň při procházejícím proudu cca 6,5A dostatečný, pro první stupeň však při proudu kompenzačního stupně cca 3,2A bude předimenzován. Stykač s menší hodnotou jmenovitého proudu však není v nabídce výrobce. Třetí až pátý stupeň bude osazen stykači BFK12 se spínaným výkonem 14kVAr a jmenovitou hodnotou proudu 18A. Proud šestého a sedmého stupně je cca 25,6A. Pro tyto stupně je zvolen stykač BFK26 se spínaným výkonem až 22kVAr a jmenovitým proudem 30A.

Tab. 6.2 Hodnoty stykačů pro jednotlivé stupně

Stupeň	Výkon 3f kondenzátoru [kVAr]	Typ stykače	Spínaný výkon stykače [kVAr]	Jm. proud stykače I_c [A]
1	2,5	BFK09 10A230	9	12
2	5	BFK09 10A230	9	12
3	10	BFK12 10A230	14	18
4	10	BFK12 10A230	14	18
5	10	BFK12 10A230	14	18
6	20	BFK26 00A230	22	30
7	20	BFK26 00A230	22	30

6.4.5 Vodiče a jištění jednotlivých stupňů

Doporučený průřez přípojovacích slaněných Cu vodičů a hodnoty jištění kompenzačních kondenzátorů jsou dány výrobcem a jsou uvedeny v katalogu výrobce.

Pokud není k dispozici katalog, je možné jmenovitý kapacitní proud kondenzátoru spočítat dle vztahu pro výpočet výkonu

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_{sn}} \quad [A] \quad (6.2)$$

Výsledná hodnota proudu se přiřadí nejbližší vyšší hodnotě normalizované řady pojistek.

Při předřazení ochranné tlumivky se však tato hodnota proudu nepatrně sníží vlivem činného odporu vinutí tlumivky. Výrobce doporučené jištění je pojistkou s pomalou vypínací charakteristikou (gG) s hodnotou rovnou alespoň 1,6 až 1,8 násobku jmenovitého proudu kondenzátoru. Např. kondenzátorem s kompenzačním výkonem 5kVAr prochází dle vztahu (6.2) proud 7,2A, jeho 1,8 násobek je cca 13A, k jištění je tedy zvolena pojistka s nejvyšší bližší hodnotou 16A. Průřez vodičů musí být dimenzován na hodnotu pojistky. Dle katalogu vodičů by byl vybrán slaněný vodič H07V-K (CYA) o průřezu 2,5mm. V tabulce na Obrázku 6.12 jsou uvedeny doporučené hodnoty pojistek a vodičů pro propojení kondenzátorů, tlumivek, stykačů a jisticích prvků.

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

Obr. 6.12 Hodnoty jištění a přípojovacích vodičů kompenzačních kondenzátorů doporučené výrobcem [5]

K jištění bude použito třípólových odpínačů pojistkových vložek OPV výrobce OEZ. Tyto přístroje jsou řešeny jako modulové s možností montáže na DIN lištu.



Obr. 6.13 Odpínač pojistkových vložek OPV10S-3 [20]

Pro prvních 5 kompenzačních stupňů bude použito odpínačů OPV10S-3, které jsou určeny pro pojistkové vložky velikosti 10x38. K jištění prvního stupně budou vzhledem k jeho

předimenzování zapojeny pojistky s hodnotou 8A. Touto hodnotou pojistky je doporučeno jistit i příslušný kondenzátor. Stupeň druhý bude jištěn pojistkou 16A dle doporučení výrobce. Třetí až pátý stupeň bude jištěn pojistkou s hodnotou 25A.

Zbylé 2 stupně budou osazeny odpínači OPV14S-3, které jsou určeny pro pojistkové vložky velikosti 14x51. Budou jištěny pojistkami o hodnotě 50A. Pro snadnější kontrolu bude stav jednotlivých pojistkových vložek signalizován světelnou signalizací S-OPV10 (S-OPV1422). Všechny hodnoty pojistek odpovídají požadavku jištění na 1,6 až 2,5 násobek jmenovitého proudu u jističů a na 1,6 až 1,8 násobek u kondenzátorů.

Celý kompenzační rozvaděč bude jištěn třípólovým řadovým pojistkovým odpínačem Varius FH000-3A/T, taktéž od výrobce OEZ. Ty umožňují bezpečně zapínat a vypínat jmenovité proudy, ale i odpínat nadproudy až do 8násobku jmenovitého proudu.



Obr. 6.14 Nožová pojiska velikosti 000 a řadový pojistkový odpínač Varius [21][22]

Odpínač bude osazen nožovými pojistkovými vložkami velikosti 000, s pomalou charakteristikou (gG) a jmenovitým proudem 125A. Hodnota pojistek odpínače je určena maximálním proudem, který může téci jednou fází. Dle vztahu (6.2) byl spočten proud cca 112A a byla vybrána nejbližší vyšší hodnota pojistky.

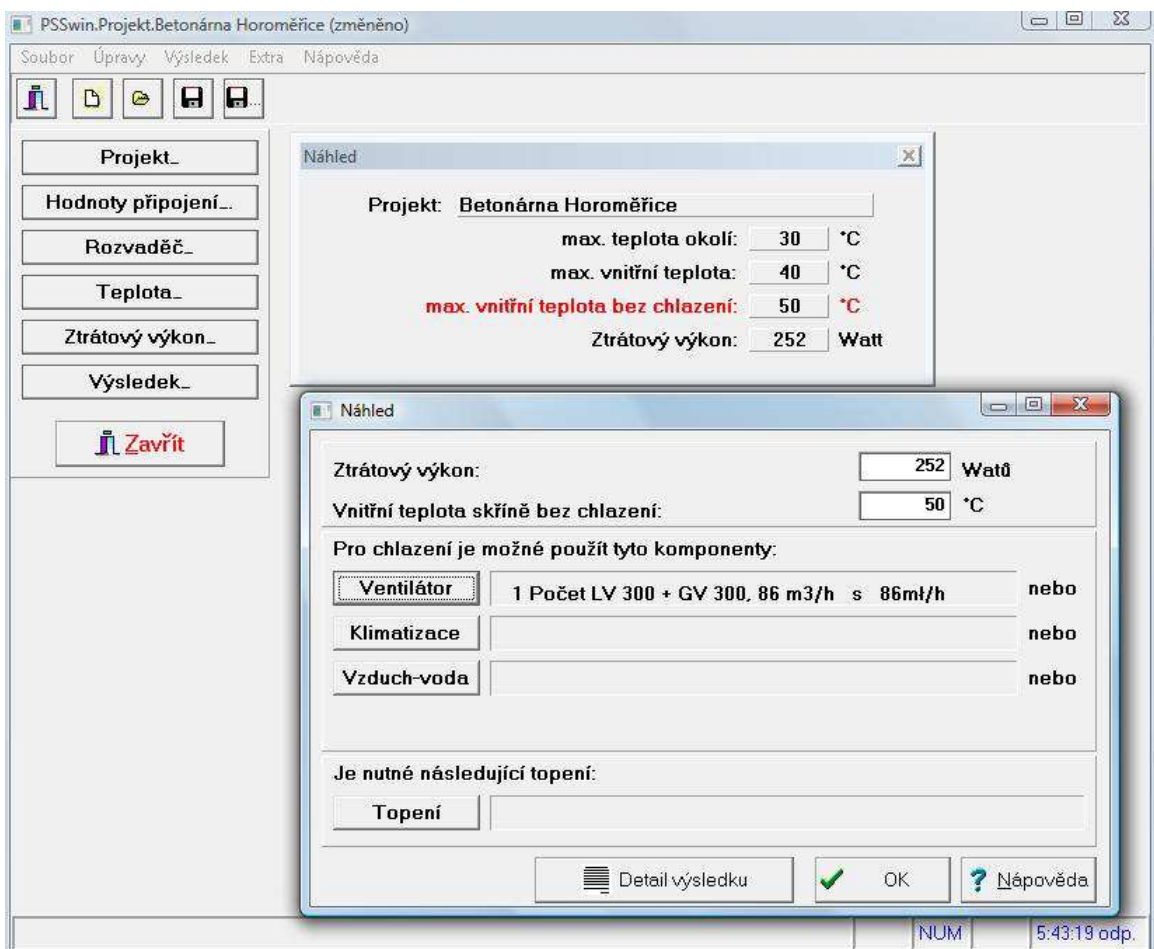
Tab. 6.3 Hodnoty pojistek a průřezů vodičů pro jednotlivé stupně

Stupeň	Výkon 3f kondenzátoru [kVAr]	Průřez připojovacích Cu vodičů [mm ²]	Jmenovitý proud pojistky [A]	Odpínač Varius – jmenovitý proud pojistky [A]
1	2,5	2,5	8	125
2	5	2,5	16	
3	10	4	25	
4	10	4	25	
5	10	4	25	
6	20	10	50	
7	20	10	50	

6.4.6 Určení ztrátového výkonu rozvaděče

Pro určení ztrátového výkonu rozvaděče jsem použil program PSSwin společnosti Schrack Technik [25]. Jedná se o jednoduchý a přesný software, který umí určit ztrátový výkon rozvaděče a navrhnout optimální řešení pro aktivní chlazení. Přesného výsledku se dosáhne zadáním údajů ztrátového výkonu nebo jmenovitých proudů jednotlivých komponent, které jsou většinou uvedeny v technické specifikaci. Program obsahuje také databáze rozvaděčů, včetně jejich rozměrů a koeficientů tepelné prostupnosti. Pro umístění všech komponent jsem vybral oceloplechový skříňový rozvaděč JRP 9204 o rozměrech 900x2000x400mm. Je zde možné zvolit způsob umístění rozvaděče, program pak automaticky přepočítá aktivní chladicí plochy. Je počítáno s přistavěním ke stěně vedle ostatních rozvaděčů.

Dále program obsahuje databáze nejběžnějších prvků používaných v rozvaděčích. Po zadání požadovaných a zjištěných teplot se dostaneme k přehlednému výsledku, který nám určí ztrátový výkon a navrhne optimální řešení pro aktivní chlazení.



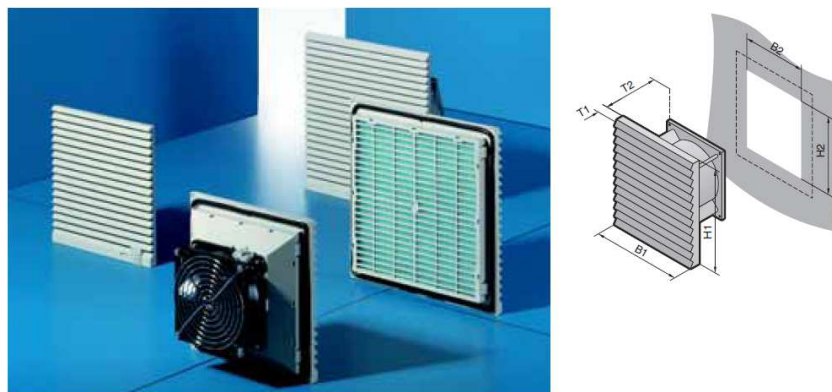
Obr. 6.15 Prostředí programu PSSwin [25]

Jako požadovaná maximální teplotu v rozvaděči byla zadána 40°C. Vzhledem k tomu, že rozvaděč bude umístěn ve vyhřívané buňce velína, jako minimální teplotu okolí jsem zadal 20°C, jako maximální 30°C pro období letních měsíců. Hodnota ztrátového výkonu byla zadána jako součet všech ztrátových výkonů všech částí rozvaděče, viz *tabulka 6.4*. Byla spočtena z údajů z technických specifikací jednotlivých komponent. Tento způsob byl zvolen z důvodu absence konkrétních použitých typů komponent v databázi programu. Nejsou započítány ztráty na vodičích, nicméně program počítá s určitou rezervou.

Tab. 6.4 Vyzářený ztrátový výkon jednotlivých komponent

Komponent	počet kusů	ztrátový výkon/ks [W]	ztrátový výkon/suma ks [W]
CSADG 1-0,44/2,5	1	1	1
CSADG 1-0,44/5	1	2	2
CSADG 1-0,44/10	3	4	12
CSADG 1-0,44/20	2	8	16
ZEZ-Cu 02,5-189/400/440	1	18	18
ZEZ-Cu 05-189/400/440	1	25	25
ZEZ-Cu 10-189/400/440	3	36	108
ZEZ-Cu 20-189/400/440	2	76	152
Ztráty pojistkové vložky 14x51	6	7	42
Ztráty pojistkové vložky 10x38	16	3,5	56
Ztrátový výkon stykačů 1W/pól	7	3	21
Ztráty pojistkové vložky velikost 000	3	9	27
Celkový ztrátový výkon [W]			480

Výstupem je návrh s výpočtem ztrátového výkonu v *Příloze č.4*, který obsahuje i konkrétní návrh ventilační jednotky. Udává potřebný objem výměny vzduchu v m^3/h k tomu, aby nebyla přesažena zadaná maximální teplota v rozvaděči. Pro nucenou ventilaci nebude použit doporučený filtrační ventilátor LV300 a odsávací filtr GV300 z důvodu vysoké ceny. Bude použit filtrační ventilátor s filtrem Rittal a výstupní mřížkou umístěnou v horním krytu rozvaděče.



Obr. 6.16 Ventilátor s filtrem Rittal [26]

Tato kombinace je schopna dodat množství vzduchu $95\text{m}^3/\text{h}$, což je něco více, než navrhovaných $78\text{m}^3/\text{h}$. Ventilátor s nižším průtokem vzduchu v kombinaci s výstupní mřížkou není k dispozici. Ventilátor bude spínán reléovým výstupem regulátoru.

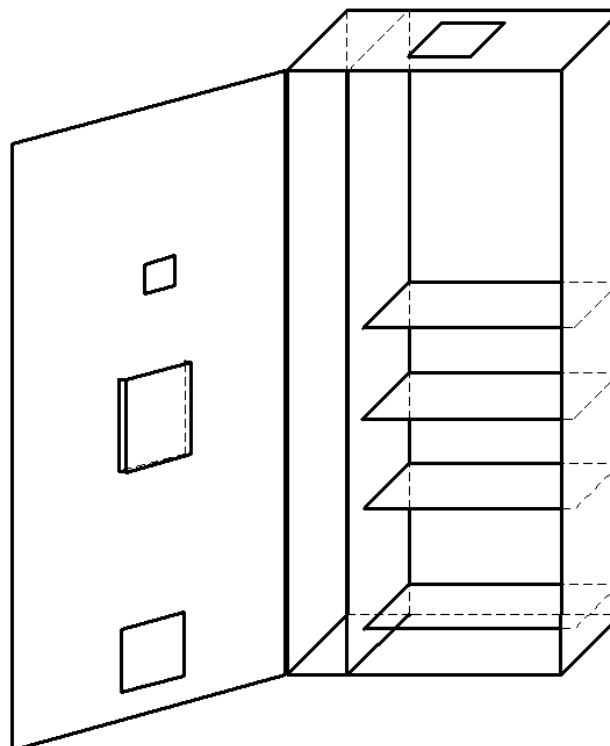
Výhodou tohoto větrání je nízká ekonomická náročnost (ventilátor má příkon 19W). Nevýhodou je propojení vnějšího a vnitřního prostoru rozvaděče a nutnost použít prachové filtry na vstupu i výstupu do rozvaděče.

Největší zdroje ztrátového výkonu jsou tlumivky. Ty jsou vybaveny vratnou tepelnou pojistkou. Ta bude zapojena do série s cívkou příslušného stykače kompenzačního stupně a v případě překročení teploty bude stupeň odpojen.

6.4.7 Rozvaděčová skříň

Všechny komponenty kompenzace budou umístěny v oceloplechovém skříňovém rozvaděči JRP 9204 Ready s krytím IP40, barvou odstínu RAL 7032, 4 montážními poli a jedním odděleným polem pro řadový odpínač. Rozvaděč bude mít jednokřídlé dveře s přihrádkou na dokumentaci, rozvorovým zavíracím systémem a bude osazen montážním panelem. Ve dveřích bude ve vrchní části otvor pro montáž regulátoru Novar. Ve spodní části bude otvor filtračního ventilátoru pro nucené chlazení. Ve vrchním krytu bude otvor pro výstupní filtrační mřížku.

rozměry 900x2000x400mm (ŠxVxH)



Obr. 6.17 Skříňový rozvaděč JRP 9204

V nejnižším poli budou umístěny kondenzátory, ve druhém a třetím poli tlumivky, v nejvyšším poli bude umístěna jistící a spínací technika. Přívod bude řešen kabelovými průchodkami v zadní části rozvaděče. Celý rozvaděč bude umístěn v buňce velína.



Obr. 6.18 Možný vzhled rozvaděče [27]

6.5 Cenová bilance a návratnost navržené kompenzace

Všechny prvky kompenzačního rozvaděče jsou naceněny z cen internetových katalogů prodejců kompenzační techniky. Současná cena rozvaděče by byla 52874Kč bez DPH.

Výsledná cena nezahrnuje dopravu rozvaděče, montáž a spojovací a drobný materiál.

Pro výpočet návratnosti investice do rozvaděče jsem uvažoval smluvní cenu 3,15Kč bez DPH za 1kWh (cena za rok 2011) a průměrnou měsíční spotřebu betonárny 15000kWh. Při 20ti pracovních dnech měsíčně je tedy denní spotřeba betonárny 750kWh. V betonárně se pracuje v jedenáctihodinových směnách.

Uvažujeme-li cenu elektrické energie $C=3,15\text{Kč/kWh}$, jsou náklady N za 1 hodinu provozu při jedenáctihodinových směnách

$$N = \frac{P}{t_s} \cdot C = \frac{750}{11} \cdot 3,15 = 68,18 \cdot 3,15 = 214,77 \text{ Kč} / h$$

Průměrný účinník bez kompenzace je $\cos\varphi=0,85$. Pro tuto hodnotu účinníku je dle *tabulky 1.1* stanovena přírážka ve výši $p_r=12,38\%$. Pak přírážka za jednu hodinu provozu činí

$$N_p = \frac{p_r \cdot N}{100} = \frac{12,38 \cdot 214,77}{100} = 26,59 \text{ Kč} / h$$

Při současné pořizovací ceně kompenzačního rozvaděče 52874Kč bez DPH je ekonomická návratnost systému

$$N_E = \frac{52874}{N_p \cdot 11} = 180,77 \text{ pracovních směn}$$

Ekonomická návratnost uvedeného řešení kompenzace je 180,77 jedenáctihodinových pracovních směn. Při uvažování 20ti pracovních dnů v měsíci se jedná o dobu 9 měsíců.

Tab. 6.5 Cenová bilance chráněného kompenzačního rozvaděče

název součásti	cena/kus	počet kusů	celkem
Regulátor účinníku Novar 1007	4100,00	1	4100,00
MTP TP23 400/5 s rozebiratelným jádrem	1208,33	1	1208,33
Odpínač pojistkové vložky OEZ OPV10S-3	191,67	5	958,33
Světelná signalizace S-OPV10	55,00	15	825,00
Odpínač pojistkové vložky OEZ OPV14S-3	433,33	2	866,67
Světelná signalizace S-OPV1422	60,83	6	365,00
Válcová pojiska 10x38 8A gG 500V	12,50	3	37,50
Válcová pojiska 10x38 10A gG 500V	12,50	1	12,50
Válcová pojiska 10x38 16A gG 500V	12,50	3	37,50
Válcová pojiska 10x38 25A gG 500V	12,50	9	112,50
Válcová pojiska 14x51 50A gG 500V	20,83	6	125,00
Třípólová propoj. lišta G3L-1000-10C 1m, 10mm ² /63A	175,00	1	175,00
Třípólová propoj. lišta S3L-1000-16 1m, 16mm ² /80A	495,83	1	495,83
Připojovací nástavec pro vodiče 6-25mm ²	25,00	6	150,00
Pojistkový odpínač OEZ Varius FH000-3A/T	633,33	1	633,33
Pojistka nožová, velikost 000, 125A gG	75,00	3	225,00
Odpínač pojistkové vložky OEZ OPV10S-1	58,33	1	58,33
Kabel CYKY 2Ax2,5mm ²	14,17	50	708,33
Kabel H07V-K1,5 černý (CYA)	4,17	25	104,17
Kabel H07V-K1,5 zelenožlutý (CYA)	4,17	5	20,83
Kabel H07V-K2,5 černý (CYA)	5,83	15	87,50
Kabel H07V-K4 černý (CYA)	8,33	25	208,33
Kabel H07V-K10 černý (CYA)	21,67	10	216,67
Kabel H07V-K16 černý (CYA)	29,17	20	583,33
CSADG 1-0,44/2,5	690,00	1	690,00
CSADG 1-0,44/5	880,00	1	880,00
CSADG 1-0,44/10	1230,00	3	3690,00
CSADG 1-0,44/20	1830,00	2	3660,00
ZEZ-Cu 02,5-189/400/440	1530,00	1	1530,00
ZEZ-Cu 05-189/400/440	1710,00	1	1710,00
ZEZ-Cu 10-189/400/440	1935,00	3	5805,00
ZEZ-Cu 20-189/400/440	2730,00	2	5460,00
Stykač BFK09 10A230	600,00	2	1200,00
Stykač BFK12 10A230	636,67	3	1910,00
Stykač BFK26 00A230	875,00	2	1750,00
Ventilátor s filtrem a výstupní mřížkou Rittal, 255mm, 230V	3440,83	1	3440,83
Rozvaděč JRP 9204 Ready IP40	8833,33	1	8833,33
Celkem náklady bez DPH			52874,00

Závěr

Kompenzace jalového výkonu je a dále i bude aktuální problematikou pro většinu průmyslových odběratelů i pro distributory elektrické energie. Pro odběratele to neznamena zvýšené náklady za elektřinu při nedodržení účinníku v zákonem požadovaném rozmezí, jak je popsáno v části 1.3. U distributorů elektrické energie jde zejména o technické problémy, které mohou vzniknout nekompenzovanými odběry. Zde se jedná například o ztráty na vedení nebo zkratové poměry v síti. Hlavní přínosy kompenzace jsou shrnuty v kapitole 1.2.

Šestá kapitola se věnuje návrhu chráněné kompenzační jednotky pro konkrétní případ. Byla vybrána betonárna. To je velmi specifický provoz, ve kterém může dojít k situaci, kdy běží pouze jediný pohon, nebo naopak všechny pohony najednou. Tento podnik již kompenzaci má, je však nedostatečná.

Nový centrální chráněný kompenzační rozvaděč by měl opět zajišťovat kompenzaci jalového výkonu pro celou betonárnu. Je stupňovitě spínáný a je složen ze sedmi stupňů. Ty byly zvoleny tak, aby se kombinací jejich spínání dosáhlo co nejpřesnějšího vykompenzování. Regulátor bude využívat vestavěného teplotního čidla a jednoho reléového výstupu ke spínání ventilátoru. Ventilátorem bude zajištěn odvod tepla výměnou vzduchu uvnitř rozvaděče a okolním prostředím. Prouděním chladnějšího vzduchu v rozvaděči se dosáhne zvýšeného odvodu tepla z jednotlivých instalovaných součástí a rovnoměrného rozložení teploty v celém objemu rozvaděče.

V rozvaděči je v případě potřeby dostatek místa pro montáž dalšího kompenzačního stupně, např. při požadavku ještě jemnější regulace. V tom případě by musel být nahrazen regulátor jiným typem s vyšším počtem výstupů.

Nový kompenzační rozvaděč oproti původnímu zabírá více místa. Také je dražší zejména o náklady na ochranné tlumivky a oceloplechový skříňový rozvaděč. Při výměně stávajícího rozvaděče bude vzhledem ke zhruba stejnému výkonu původní kompenzace zachováno stávající silové připojení.

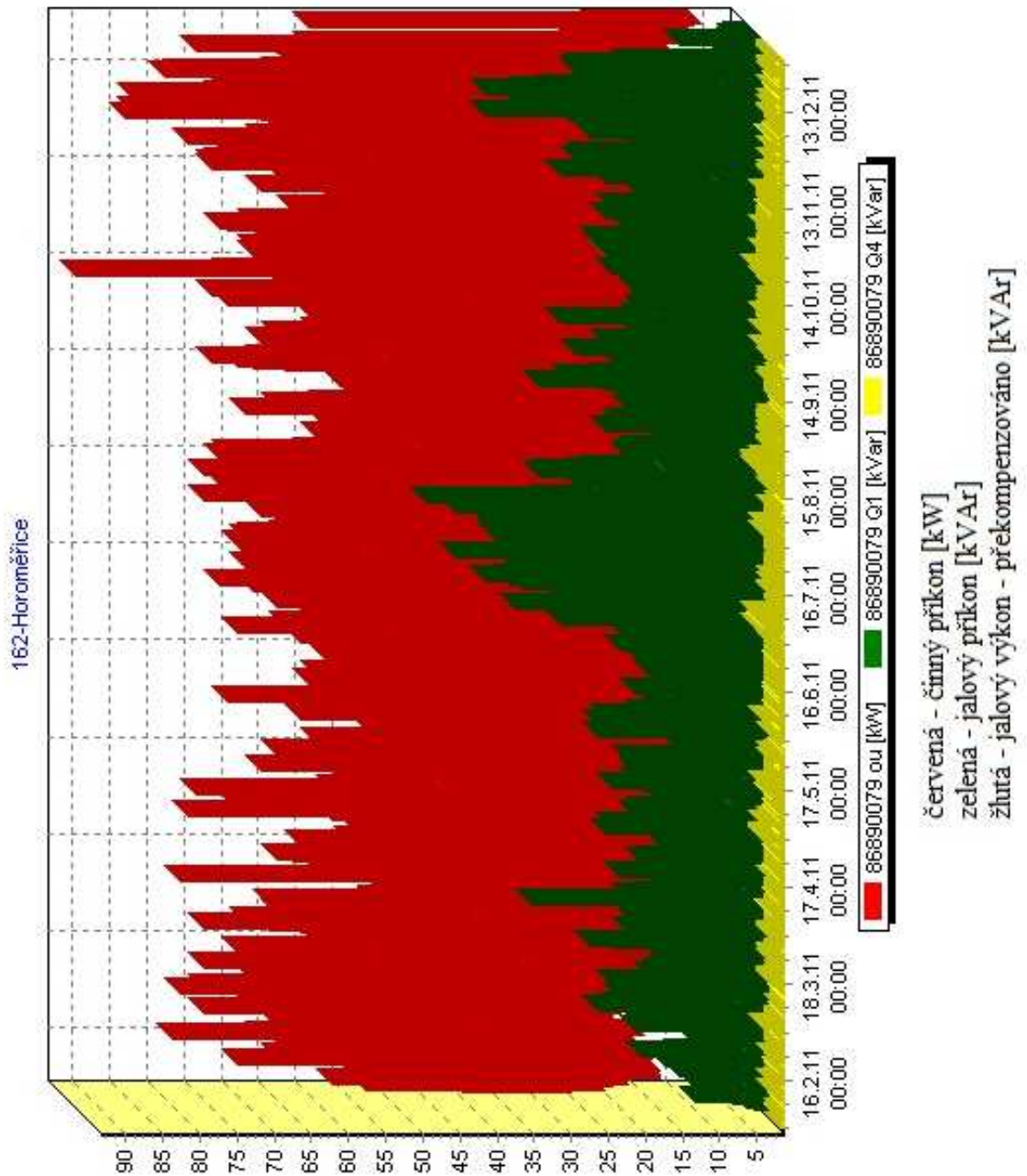
Použitá literatura

- [1] Hála, B., Lacina, B.: Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů.
Elektromanagement, Brno 1994
- [2] Korenc, V., Holoubek, J.: Kompenzace jalového výkonu v praxi. IN-EL, spol. s r.o.
1999
- [3] Tesařová, M., Štroblová, M.: Průmyslová elektroenergetika. Západočeská univerzita
v Plzni, Plzeň 2000
- [4] Rulf, M.: Kompenzace účinníku v rozvodném zařízení. Plzeň, 2006. 66s.
Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [5] ZEZ Silko, s.r.o. Produkty – kompenzační kondenzátory [online].
[přístup 4.3.2012]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/PDFs/pfcnew.pdf>
- [6] Česká energetika. Regulátory jalového výkonu NOVAR [online]. [přístup 4.3.2012].
Dostupné z: <http://www.ceskaenergetika.cz/download.php?id=1887>
- [7] ZEZ Silko, s.r.o. Produkty – kondenzátorové stykače [online].
[přístup 4.3.2012]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=72b>
- [8] KMB systems, s.r.o. Regulátory účinníku – tyristorové spínací moduly [online].
[přístup 4.3.2012]. Dostupné z: <http://www.kmb.cz/07/doc/KATKA-Clanek-v1-cze.pdf>
- [9] Energetický regulační úřad. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu
č.7/2011 [online]. [přístup 3.3.2012]. Dostupné z:
http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV_7_2011.pdf
- [10] Elcom, a.s. Divize Aplikovaná elektronika [online]. [přístup 6.3.2012].
Dostupné z: <http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/146-aktivni-filtry---obecne.html>
- [11] Kůs, V.: Nízkofrekvenční rušení, skriptum ZČU Plzeň, 5/2003
- [12] Silveratech, s.r.o. Tlumivky [online]. [přístup 7.3.2012].
Dostupné z: <http://www.silveratech.cz/stranka-tlumivky-35>
- [13] Zapa. Fotogalerie [fotografie]. [přístup 20.3.2012] Dostupné z:
http://www.zapa.cz/admin_images/photogallery/224_full.jpg
- [14] Merko CZ, Míchačky betonu [fotografie]. [přístup 20.3.2012].
Dostupné z: <http://www.merko.cz/lang-cz/michacky-betonu.html>
- [15] Asterix a.s., Produkty – obslužný software [fotografie]. [přístup 25.3.2012].

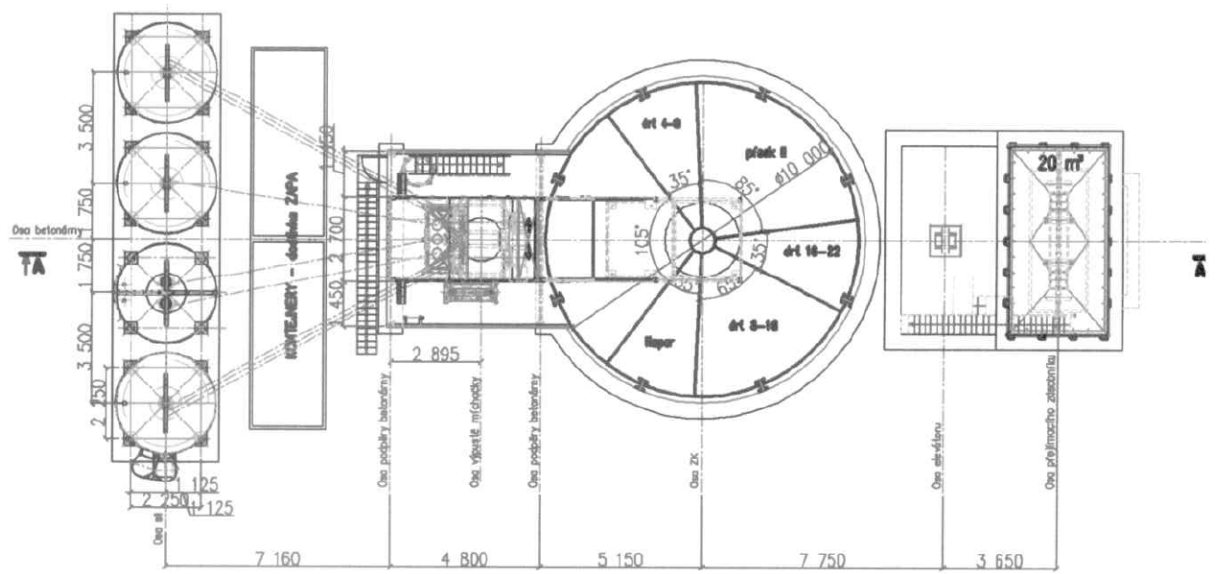
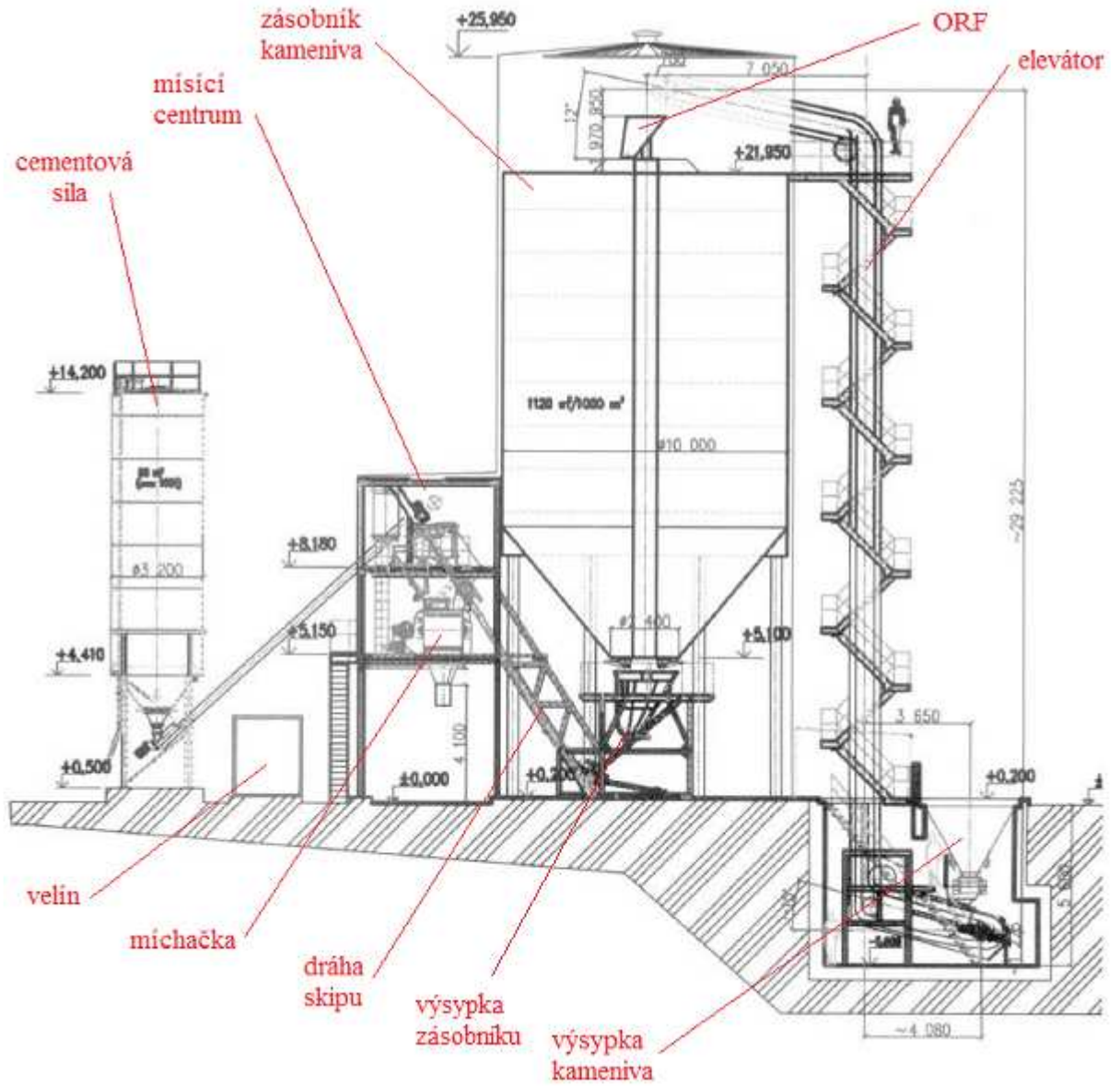
- Dostupné z: <http://asterix.cz/moin/AtxB300Cs>
- [16] SCHWING Stetter Ostrava s.r.o. Produkty – recyklační zařízení [fotografie]. [přístup 8.4.2012]. Dostupné z: <http://www.schwing.cz/cs/produkty/recyklacni-zarizeni/>
- [17] KMB systems, s.r.o. Regulátory účiníku – Novar 1005 a 1007 [online]. [přístup 29.3.2012]. Dostupné z: http://www.kmb.cz/07/doc/NOVAR_1xxx-Manual-v17-cze.pdf
- [18] ZEZ Silko, s.r.o. Produkty – hradící tlumivky NN [online]. [přístup 29.3.2012]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=73a>
- [19] Lovato spol. s r.o. Katalogy – stykače – kompenzace jalové energie [online]. [přístup 3.4.2012]. Dostupné z: <http://knihovna.lovato.cz/save.php?kid=40>
- [20] OEZ s.r.o. Odpínače a odpojovače válcových pojistek [online]. [přístup 29.3.2012]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/produkty/odpinace-a-odpojovace-valcovych-pojistek>
- [21] OEZ s.r.o. Řadové pojistkové odpínače [online]. [přístup 29.3.2012]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1291-Z01-12_CZ_SK.pdf
- [22] OEZ s.r.o. Pojistkové vložky PN [online]. [přístup 29.3.2012]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1327-Z01-10_CZ_SK.pdf
- [23] Vibros s.r.o. Příložné vibrátory [fotografie]. [přístup 9.4.2012]. Dostupné z: <http://www.vibros.cz/prilozne-vibratory/>
- [24] ELEKTRO Brůna spol. s r.o. Sortiment – rozvaděče a rozvodnice [online]. [přístup 9.4.2012]. Dostupné z: <http://www.bruna-elektro.cz/soubor-katalog-skrinovych-rozvadecu-17-.pdf>
- [25] Schrack Technik. Produkty a obchod – ke stažení – pro projektanty [software]. [přístup 10.4.2012]. Dostupné z: http://www.schrack.cz/fileadmin/f/cz/Bilder/Ke_stazeni/Pro_projektanty/PSSWin.exe
Požadavky na systém: PC Windows XP, Vista, 512 MB RAM, 5MB místa na disku
- [26] Rittal Czech, s.r.o. Produkty – klimatizační systémy – ventilátory s filtrem [online]. [přístup 11.4.2012]. Dostupné z: http://www.rittal.cz/pdf/pages/katalog_32cz_691.pdf
- [27] Emcos s.r.o. Ke stažení – Kompenzační rozvaděče VARKOM/VARKOM B (katalogový list 2012) [online]. [přístup 10.4.2012]. Dostupné z: <http://www.emcos.cz/pdf/KE-EM-EMV.pdf>
- [28] Osobní konzultace ve firmě P.T.K Elektro, Praha
- [29] Osobní návštěva betonárny ZAPA v Horoměřicích u Prahy a materiály této firmy

Přílohy

Příloha č.1 Graf hodnot ¼hodinového maxima [26]



Příloha č.2 Popis technologie betonárny [26]



Příloha č.3 Seznam pohonů betonárny [26]

	Pohon	P [kW]	cos φ	účinnost η	Proud I [A]
Doprava materiálu	vibrátor (vibrace kameniva-zásobník 1)	0,38	0,86	0,71	0,90
	vibrátor (vibrace kameniva-zásobník 3)	0,38	0,86	0,71	0,90
	vibrátor váhy kameniva	0,18	0,8	0,73	0,44
	vibrátor váhy cementu	0,38	0,86	0,71	0,90
	vibrátor (posun kameniva)	0,37	0,86	0,71	0,87
	vibrátor (posun kameniva)	0,37	0,86	0,71	0,87
	elevátor – kapsový dopravník	30	0,89	0,92	52,88
	otočný rozdělovač frakcí (ORF)	0,37	0,82	0,66	0,99
	vibrátor na elevátoru (oklep-prašný pás)	2,2	0,86	0,84	4,40
	vibrační podávač (šachta)	0,75	0,8	0,77	1,76
	vibrační podávač (šachta)	0,75	0,8	0,77	1,76
	vibrační podávač (šachta)	0,75	0,8	0,77	1,76
	vibrační podávač (šachta)	0,75	0,8	0,77	1,76
	šnekový dopravník – cement	15	0,9	0,9	26,73
	šnekový dopravník – cement	15	0,9	0,9	26,73
	šnekový dopravník – cement	15	0,9	0,9	26,73
	šnekový dopravník – cement	15	0,9	0,9	26,73
	čerpadlo – tekutá přísada	0,37	0,8	0,65	1,03
	čerpadlo – tekutá přísada	0,37	0,8	0,65	1,03
	čerpadlo – tekutá přísada	0,37	0,8	0,65	1,03
	čerpadlo – tekutá přísada	0,37	0,8	0,65	1,03
	čerpadlo – tekutá přísada	0,37	0,8	0,65	1,03
čerpadlo – tekutá přísada	0,37	0,8	0,65	1,03	
Míchání	kompresor	7,5	0,74	0,86	17,01
	pohon míchačky	37	0,9	0,92	64,50
	pohon míchačky	37	0,9	0,92	64,50
	odsávání míchačky	2,2	0,85	0,82	4,56
	oklep filtru – odsávání	0,37	0,86	0,71	0,87
	čerpadlo vody z váhy vody do míchačky	15	0,84	0,9	28,64
	Skip	30	0,88	0,92	53,48
	vibrátor skluzu betonu	0,38	0,86	0,71	0,90
Recykl. zařízení	pohon šnekového vymývače	11	0,84	0,89	21,24
	motor vrtule (míchání kalové vody)	5,5	0,88	0,86	10,49
	čerpadlo násypky	1,1	0,81	0,77	2,55
	čerpadlo kalové vody do váhy vody	7,5	0,82	0,87	15,17
	přenos. čerpadlo pro přečerpávání povrch.vody	1,5	0,85	0,79	3,22
	čerpadlo do mixu	1,1	0,81	0,77	2,55
čerpadlo do mixu	1,1	0,81	0,77	2,55	

Příloha č.4 Výstupní zpráva programu PSSwin

CHLAZENÍ ROZVADĚČE OD ROKU 1985
 COPYRIGHT by PFANNENBERG Version Sept. 2004

Schrack - software - service Vaše nejlepší volba

SCHRACK, 102 00 Praha, Dolnoměcholupská 2
 Telefon +420 281 008 231, Fax +420 281 008 462

Firma :

Jméno :
 Projekt : Betonárna Horoměřice
 Datum založení : 12.04.2012
 poslední změna :

Jmen. napětí : 400 voltů
 Jmen. proud : 125 ampér

Použitý rozvaděč :
 skupina : žádný
 Typ : žádný
 Šířka : 900 mm
 výška : 2000 mm
 Hloubka : 400 mm

Způsob instalace : První nebo poslední pole, přistavené ke stěně.
 Materiál rozvaděče : ocelový plech

Teploty :
 Maximální teplota okolí = 30 st. celsia
 Minimální teplota okolí = 20 st. celsia
 Maximální vnitřní teplota = 40 st. celsia
 Minimální vnitřní teplota = 5 st. celsia
 Relativní vlhkost = 75 %

Celková vypočítaná ztráta	480 watt
Absorbovaný/vyzářený výkon rozvaděčem	-228 watt
Celková tepelná ztráta	252 watt

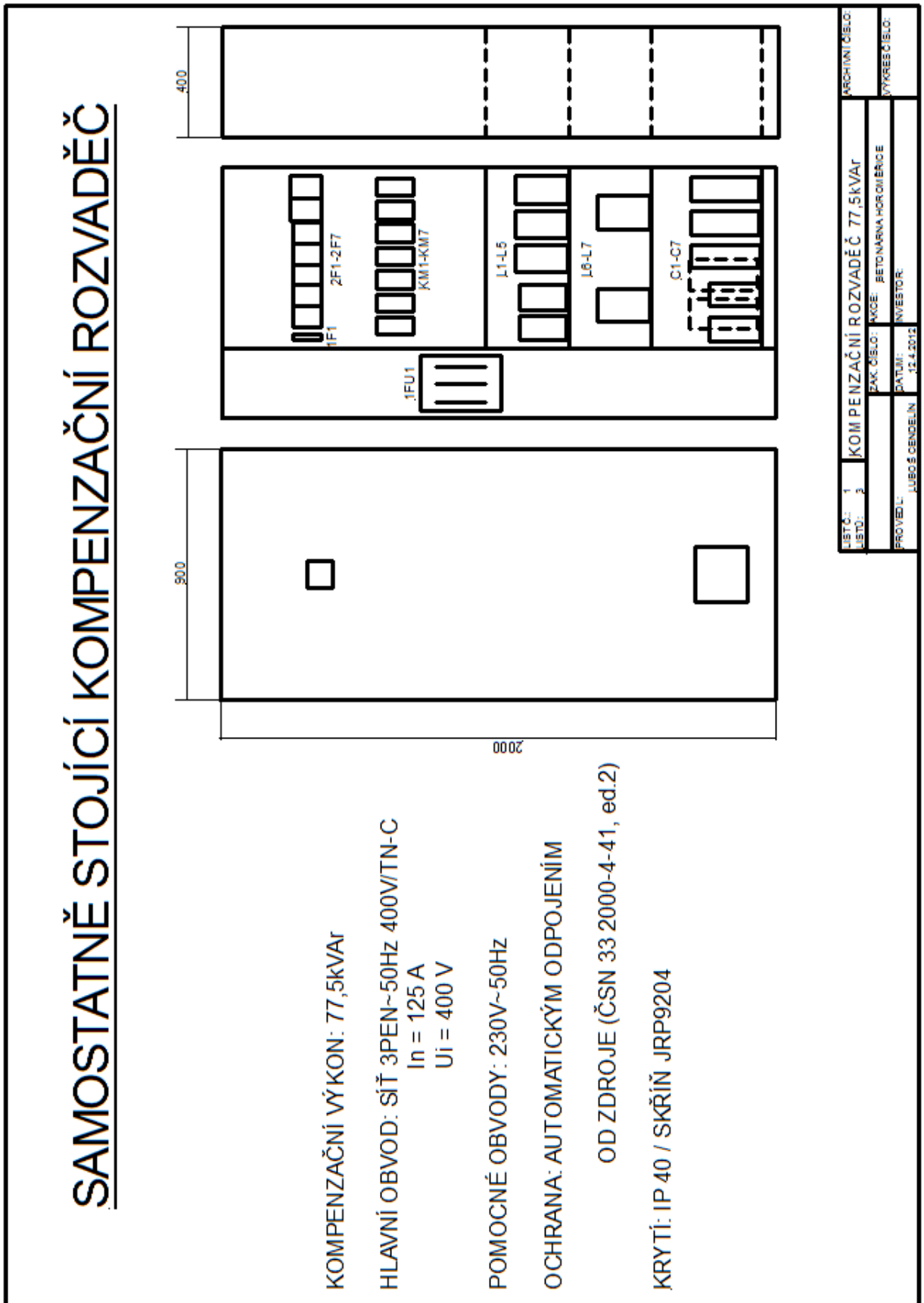
kvůli teplotní diferencii 10 kelvin
 je potřeba vyměnit 78 m³/h

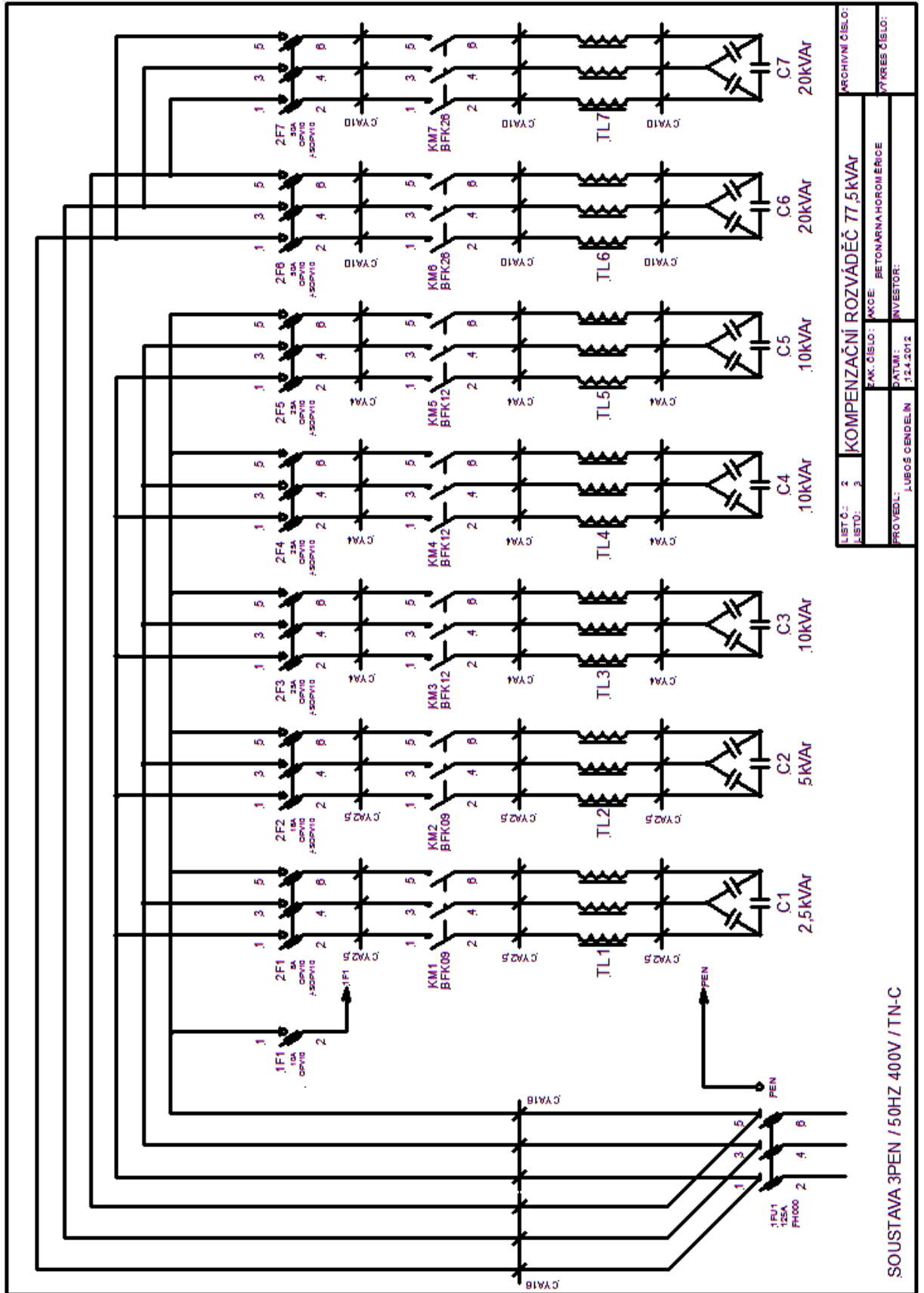
V tomto případě
 mohou být použity následující komponenty:

1 ventilátor: LV300 se standardní filtrační vložkou
 230V 50Hz/60Hz nebo
 1 výstupní filtr: GV 300
 průtok vzduchu max. 86 m³/h

LV300:	výška = 204 mm,	GV 300:	výška = 204 mm
	šířka = 204 mm		šířka = 204 mm
	Hloubka= 7 mm (nástavba)		Hloubka= 7 mm
	Hloubka= 96 mm		Hloubka= 32 mm

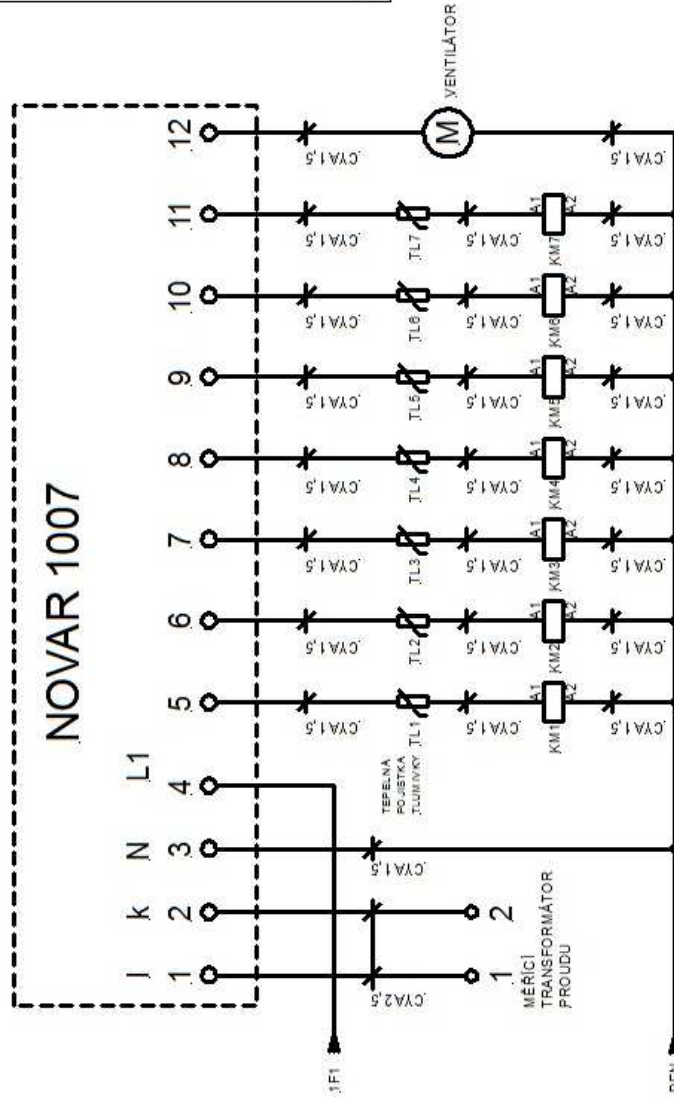
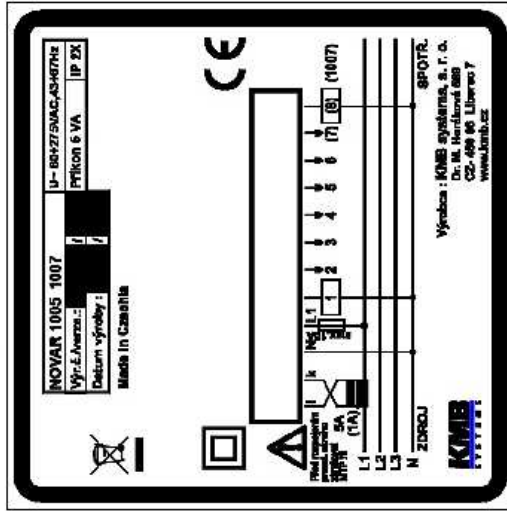
Příloha č.5 Schéma zapojení rozvaděče





LIST Č.: 2	ARCHIVNÍ ČÍSLO:
LISTO: 2	PROJEKČNÍ ČÍSLO:
KOMPENZAČNÍ ROZVÁDĚČ 77,5kVAR	
ZAK. ČÍSLO:	KACE: BETONARNAHORNĚŘICE
PROVEDL: LUBOŠ CENDELÍN	INVESTOR:
DATEM: 12.11.2012	PROJEKČNÍ ČÍSLO:

REGULÁTOR NOVAR 1007 (SVORKOVNICE)



LIST. ČÍSLO: 3	ARCHIVNÍ ČÍSLO:
LISTO: 3	
ZAK. ČÍSLO: KACE - BETONÁRNA POROMÉRIE	KOMPENZAČNÍ ROZVADĚČ 77,5kVAR
PROVEDL: LUBOŠ CENDELÍN	INVESTOR:
DATAUM: 31. 4. 2012	