

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody kompenzace účinníku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav MALÍK**
Osobní číslo: **E10B0228P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Metody kompenzace účinníku**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou kompenzace účinníku a proveďte teoretický rozbor této oblasti.
2. Proveďte měření kompenzace účinníku různých druhů zátěže pomocí regulátoru jalového výkonu Novar.
3. Zhodnoťte naměřené výsledky.
4. Zmapujte trh se zařízením pro kompenzaci účinníku a popište vývoj v této oblasti.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

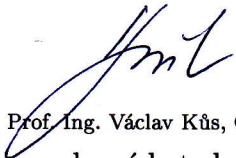
1. Bude upřesněno vedoucím práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Viktor Majer**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá kompenzací účinníku. V úvodní části práce jsou definovány teoretické předpoklady, týkající se této oblasti. Je zde vysvětlen princip kompenzace a rozdělení kompenzace podle možností zapojení. Praktická část práce se zabývá kompenzací účinníku transformátoru v chodu naprázdno, což představuje konstantní odběr jalové energie. Pro měření proměnné jalové energie je použit autotransformátor s připojeným asynchronním motorem. Měření kompenzace je prováděno pomocí rychlého regulátoru NOVAR 1312. V poslední kapitole jsou uvedena zařízení potřebná ke kompenzaci, která jsou aktuálně nabízená na trhu.

Klíčová slova

Kompenzace účinníku, jalový výkon, regulátor, kompenzační zařízení, kondenzátor, ochranná tlumivka, hrazená kompenzace, aktivní filtr, transformátor.

Abstract

This work deals with the power factor correction. The first part of this thesis deals with the theoretical assumptions. There is explained the principle of power factor correction and its distribution by the possibility of involvement. The practical part of this work deals with the power factor correction transformer in idle, which represents a constant reactive power of the consumption. For the measurement the variable reactive power the auto-transformer which is connected to asynchronous motor is used. The measurement of power factor correction is performed by using a fast controller Novar 1312. The latest chapter of this work describes the necessary equipment to power factor correction which are been currently offered in the mart.

Keywords

Power factor correction, reactive power, regulator, compensating device, capacitor, protective reactor, detuned power factor correction, active filter, transformer.

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 4. 6. 2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Viktoru Majerovi za cenné profesionální rady a připomínky k této práci.

Velké poděkování také patří rodičům za jejich všestrannou podporu a trpělivost, kterou mi projevovali při mém studiu.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 O KOMPENZACI	11
1.1 DRUHY VÝKONŮ	11
1.2 PRINCIP KOMPENZACE	12
1.3 DŮVODY PRO KOMPENZACI	13
1.4 DRUHY KOMPENZACE	13
1.4.1 <i>Individuální kompenzace</i>	14
1.4.2 <i>Skupinová kompenzace</i>	14
1.4.3 <i>Centrální kompenzace</i>	15
2 ZAŘÍZENÍ KE KOMPENZACI	15
2.1 DRUHY KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ	15
2.1.1 <i>Rotační zařízení</i>	16
2.1.2 <i>Statické kompenzátory</i>	17
2.2 HRAZENÁ KOMPENZACE	19
2.2.1 <i>Pasivní filtry</i>	20
2.2.2 <i>Aktivní filtry</i>	20
2.3 REGULÁTORY JALOVÉHO VÝKONU	21
2.3.1 <i>Starší typy regulátorů</i>	22
2.3.2 <i>Moderní regulátory účinníku</i>	22
3 MĚŘENÍ KOMPENZACE POMOCÍ REGULÁTORU NOVAR 1312	22
3.1 POPIS MĚŘENÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	23
3.1.1 <i>Transformátor</i>	23
3.1.2 <i>Autotransformátor zatížen asynchronním motorem</i>	23
3.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ	24
3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	25
3.3.1 <i>Statická zátěž</i>	25
3.3.2 <i>Proměnná zátěž</i>	27
3.4 ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	29
4 ZAŘÍZENÍ KE KOMPENZACI NA TRHU	30
4.1 REGULÁTORY	30
4.1.1 <i>Regulátory NOVAR</i>	30
4.1.2 <i>Další mikroprocesorové regulátory na trhu</i>	31
4.2 STATICKÉ KONDENZÁTORY	32
4.2.1 <i>Kondenzátory pro NN</i>	32
4.2.2 <i>Kondenzátory pro VN</i>	33
4.3 MĚŘICÍ TRANSFORMÁTOR PROUDU	33
4.4 TLUMIVKY	34
4.5 SPÍNACÍ ZAŘÍZENÍ	34
4.5.1 <i>Stykače</i>	34
4.5.2 <i>Bezkontaktní spínací prvky</i>	35
4.6 KOMPENZAČNÍ ROZVADĚČ	36
5 ZÁVĚR	37
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	38

Úvod

V dnešní době se zvyšuje spotřeba elektrické energie a tím se zvyšují požadavky na její přenos, distribuci a kvalitu. Sítě jsou stále více zatěžovány, a proto je snaha co nejvíce omezit zbytečně přenášený jalový výkon a tak zmenšit ztráty na vedení. Jednotlivé typy kompenzací umožňují lokální dodávku potřebného jalového výkonu pro chod stroje. Z ekonomických důvodů distribuční společnosti kontrolují, aby síť byla vykompenzovaná a přenášel se pouze činný výkon. Za nedodržení požadované hodnoty účinníku hrozí firmám finanční sankce.

Účinník není v energetice žádným novodobým objevem. Nutnost energie na vytvoření elektromagnetického pole popsal v roce 1864 skotský fyzik Maxwell. V roce 1894 Rakušan Kappa napsal příručku „Electric Transmission of Energy“, kde je poprvé uvedena rovnice pro střídavý výkon zahrnující účinník.[1]

Většina spotřebičů v průmyslu potřebuje ke své funkci vytvořit elektromagnetické pole. Vlivem indukčnosti dochází k posunu fázoru proudu za fázor napětí, tím se vytváří jalová složka induktivního charakteru, která zvyšuje přenášený zdánlivý výkon. Naopak při kapacitní zátěži, tvořené nejčastěji kondenzátory dochází k posunu fázoru proudu před fázor napětí, a tak dochází ke vzniku jalového výkonu kapacitního charakteru. Podíl mezi činným a zdánlivým výkonem vyjadřuje účinník. Ten může nabývat hodnot od 0 do 1. Přičemž číslo 1 znamená, že je odebírán pouze činný výkon. Požadovaná hodnota účinníku je 0,95 – 1 induktivního charakteru.

V průmyslu většinu jalového výkonu induktivního charakteru tvoří asynchronní motory, které nejsou trvale zapnuty. Dochází k neustálé změně velikosti jalového výkonu, a tak je třeba měnit i velikost kompenzačních stupňů.

V praktické části bakalářské práce bude provedeno měření s regulátorem NOVAR 1312. Nejprve bude provedena kompenzace na trojfázovém olejovém transformátoru v chodu naprázdno, na kterém bude změřen stav účinníku před a po kompenzaci. Dalším přístrojem bude autotransformátor, který bude pomocí změny velikosti napětí měnit odebíraný jalový výkon asynchronního motoru. Bude sledován růst jalového výkonu při zvyšujícím se napětí a postupné spínání jednotlivých kompenzačních stupňů.

Seznam symbolů a zkratk

C_D [F]	Kapacita kondenzátoru v zapojení do trojúhelníka
C_Y [F]	Kapacita kondenzátoru v zapojení do hvězdy
$\cos \varphi$ [-]	Účinník
$\cos \varphi_k$ [-]	Účinník po kompenzaci
f [Hz]	Kmitočet sítě
I [A]	Proud
I_ξ [A]	Činný proud
I_C [A]	Proud kondenzátorem
I_{eff} [A]	Průměrná hodnota efektivních hodnot proudů všech fází L1, L2, L3
I_j [A]	Jalový proud
I_k [A]	Proud po kompenzaci
I_{jk} [A]	Jalový proud po kompenzaci
I_{rea} [A]	Jalová složka základní harmonické proudu
Im	Imaginární část
D [VA]	Deformační výkon
P [W]	Činný výkon
Re	Reálná část
Q [var]	Jalový výkon
Q_B [var]	Jalový výkon kondenzátorové baterie
Q_C [var]	Jalový výkon kondenzátoru
Q_k [var]	Jalový výkon po kompenzaci
S [VA]	Zdánlivý výkon
U_f [V]	Fázové napětí
U_S [V]	Sdružené napětí
X_C [V]	Kapacitní reaktance
X_L [V]	Indukční reaktance
λ [-]	Opravdový účinník
ω [rad/s]	Úhlová rychlost (pro 50 Hz má hodnotu $100 \cdot \pi$)
ω_{REZ} [rad/s]	Úhlová rychlost při rezonanci
φ [°]	Úhel mezi proudem a napětím
φ_k [°]	Úhel mezi proudem a napětím po kompenzaci

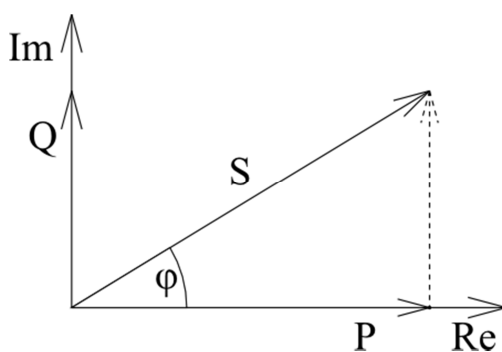
1 O kompenzaci

Tato kapitola se zabývá základním rozdělením jednotlivých druhů výkonů a vysvětlením principu kompenzace.

1.1 Druhy výkonů

Výkon, který se přeměňuje na práci, je nazýván výkonem činným. Pouze činný výkon odebírají zařízení, jako jsou odporová topidla a žárovky. Pokud spotřebič či zdroj elektrické energie potřebuje ke své funkci vytvořit elektromagnetické nebo elektrické pole, dochází pak k vzájemnému posunu mezi fázorem proudu a fázorem napětí. Převažuje-li v síti indukčnost nebo kapacita, dochází k přenosu jalové energie mezi zdrojem a napětím. Jalová energie je potřeba k vytvoření pole, ale činnou práci nekoná, pouze se přelévá mezi zdrojem a spotřebičem. Ke spotřebiči se musí dopravit celkový proud tvořen činnou i jalovou složkou. Tento proud v sobě zahrnuje zdánlivý výkon. Vztah mezi těmito výkony zobrazuje Obrázek 1-1.[3,8,10]

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.1)$$



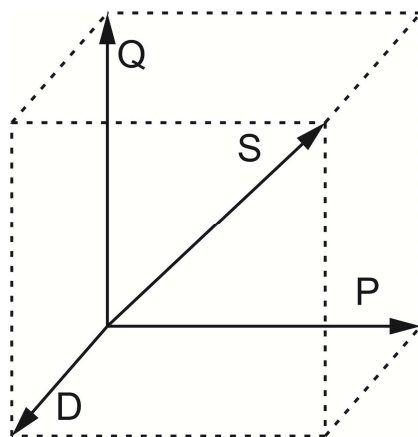
Obrázek 1-1 - Trojúhelník výkonů

Vztah (1.1) zahrnuje výkon pouze pro první harmonickou. Vyskytují-li se v síti vyšší harmonické, zvyšuje se tím i zdánlivý výkon. Vztah (1.2) pro výpočet zdánlivého výkonu již zahrnuje deformační výkon, který je tvořen vlivem vyšších harmonických. Vztah mezi jednotlivými výkony je znázorněn pomocí tzv. kvádrů výkonů (Obrázek 1-2).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.2)$$

Pokud se zahrne i deformační výkon, lze vypočítat opravdový účinník označovaný λ . [8]

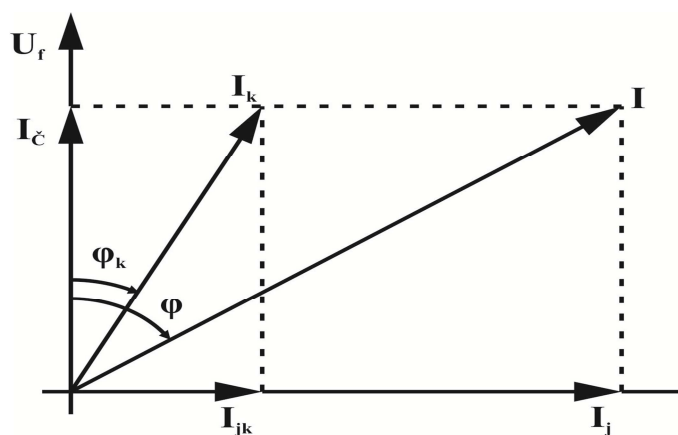
$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (1.3)$$



Obrázek 1-2 - Kvadr výkonů

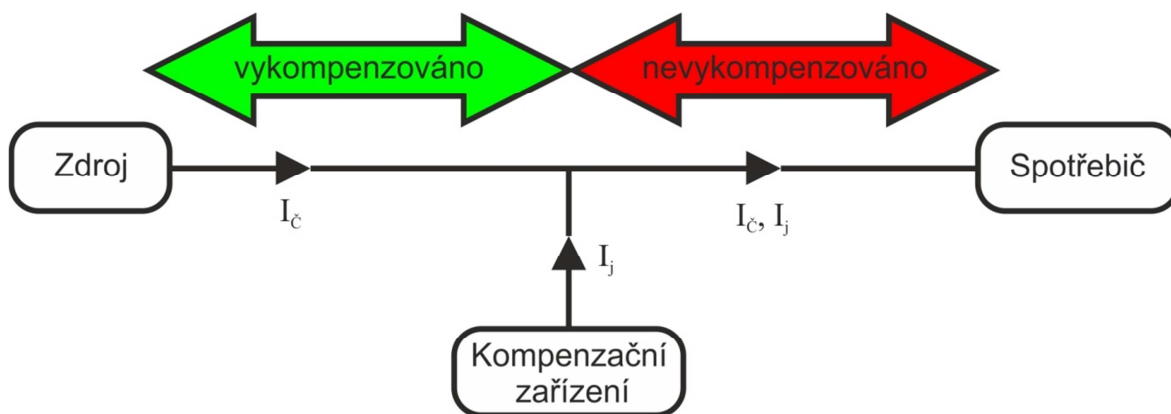
1.2 Princip kompenzace

V průmyslu se vyskytuje většina spotřebičů jalového výkonu s induktivním charakterem. Proto, abychom eliminovali tuto složku, musíme vytvořit elektrické pole, které vytváří jalový výkon opačného charakteru, tedy kapacitního. Budou-li se tyto dvě složky velikostně rovnat, nebude se přenášet mezi zdrojem a spotřebičem žádná jalová energie. Snížení celkového proudu I , při zachování velikosti činné složky, je zobrazen na Obrázku 1-3.[2,3]



Obrázek 1-3 - Důsledek kompenzace [3]

Připojením kompenzátoru do obvodu neznamená, že bude vykompenzovaná celá délka vedení. Vykompenzována bude pouze ta část vedení, která spojuje zdroj s kompenzátořem, viz Obrázek 1-4.[10]



Obrázek 1-4 – Působení kompenzace [10]

Potřebný kompenzační výkon, který je třeba dodat do sítě, se vypočítá jako rozdíl mezi jalovým výkonem před kompenzací Q a jalovým výkonem po kompenzaci Q_k .

$$Q_{kom} = Q - Q_k = P \cdot \operatorname{tg} \varphi - P \cdot \operatorname{tg} \varphi_k = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \quad (1.4)$$

1.3 Důvody pro kompenzaci

Přívodní vedení ke spotřebiči musí být schopno přenést velikost zdánlivého výkonu. To znamená, že se přenáší činná i jalová složka proudu. Jelikož ztráty na vedení vzrůstají s kvadrátem proudu (viz rovnice 1.5), dochází tak na nevykompenzovaném vedení ke zvýšení ztrát. Větší ztráty jsou vlivem většího procházejícího proudu i na transformátorech.

$$P = R \cdot I^2 \quad (1.5)$$

Použití vhodné kompenzace má tyto výhody:

- snížení ztrát při přenosu elektrické energie,
- zvýšení účinnosti některých zařízení jako jsou např. transformátory,
- snížení pořizovacích nákladů – vedení, transformátory, vypínače, jističí a měřicí přístroje se dimenzují na velikost zdánlivého výkonu, který se vlivem kompenzace zmenšuje.[3]

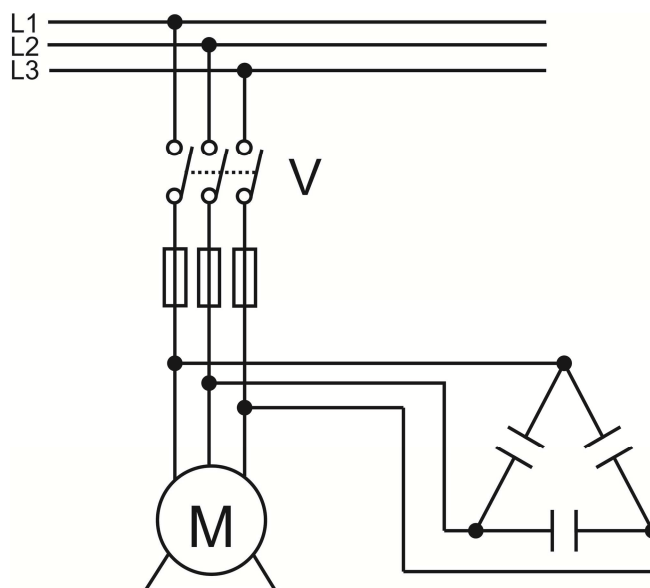
1.4 Druhy kompenzace

Kompenzátor lze do obvodu zapojit sériově nebo paralelně. Sériovým zapojením kondenzátoru se nemění velikost procházejícího proudu, ale jsou ovlivňovány parametry vedení, jako je zmenšení jeho reaktance, a tak i snížení úbytku napětí. Nevýhodou je, že kondenzátor musí být dimenzován na procházející proud. Sériová kompenzace je využívána jen pro kompenzaci dlouhých vedení.

Ke kompenzaci účinníku ve všech průmyslových zařízeních používá paralelní zapojení. To dále ještě dělíme na zapojení individuální, skupinové a centrální.[2,3]

1.4.1 Individuální kompenzace

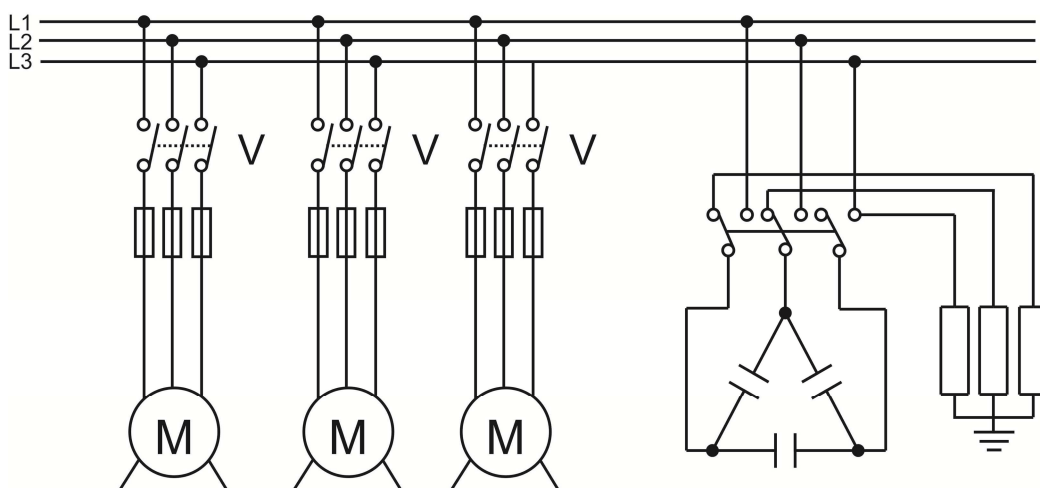
V tomto zapojení má každé zařízení, které odebírá jalový výkon, na své přívodní svorky připojený kondenzátor, který je navržen speciálně pro dané zařízení. Kondenzátor se zapíná a vypíná s daným zařízením. Jalový výkon se vykompenzuje rovnou na svorkách přístroje a není tak zatěžováno vedení až ke spotřebiči. Nevýhodou tohoto typu kompenzace je nemožnost regulace, při kolísání jalové energie. Toto zapojení je vhodné pro velké motory s vysokým časovým využitím. Zapojení individuální kompenzace je na Obrázku 1-5.[2,3]



Obrázek 1-5 – Individuální kompenzace [3]

1.4.2 Skupinová kompenzace

Při skupinové kompenzaci je zapojeno několik induktivních spotřebičů k jedné kompenzační baterii. Při tomto zapojení je nutno již použít regulátor jalového výkonu, protože celková jalová energie je proměnná v důsledku zapnutí jednotlivých zařízení. Velikost kompenzační baterie se navrhuje na výpočtové zatížení skupiny spotřebičů s respektováním činitele soudobosti jednotlivých zařízení. Využívá se především pro jednotlivé dílny, kde je mnoho motorů nedaleko od sebe.[2,3]



Obrázek 1-6 - Skupinová kompenzace [3]

1.4.3 Centrální kompenzace

Zapojení pro centrální kompenzaci je shodné se schématem pro skupinovou kompenzací pouze s tím rozdílem, že je připojen větší počet kompenzovaných přístrojů. Kompenzátor je připojen na přípojnice v hlavním rozvaděči, který napájí celý průmyslový areál. Nevýhoda tohoto způsobu zapojení je, že rozvod elektrické energie v areálu firmy zůstává nevykompenzován.[2,3]

Mezi další druhy zapojení patří kombinovaná kompenzace, která je kombinací předchozích druhů kompenzace. Velké pohony mají svou individuální kompenzaci a společná centrální kompenzace udržuje účinník pro celý podnik.

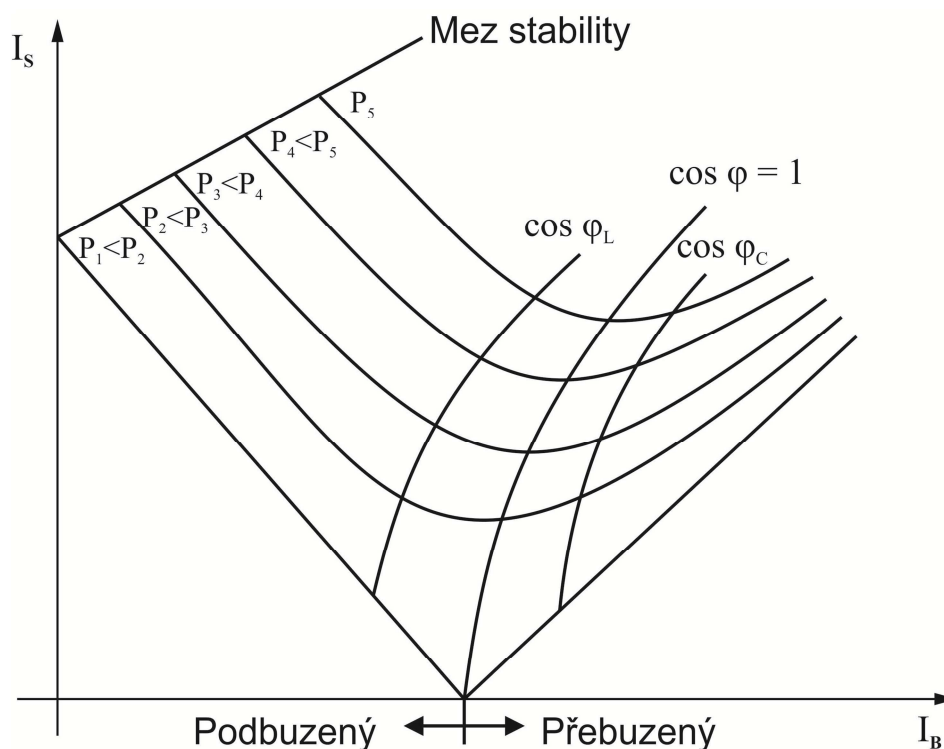
2 Zařízení ke kompenzaci

2.1 Druhy kompenzačních zařízení

Kompenzátor je zařízení, které připojením do obvodu vykompenzuje svým opačným charakterem jalového výkonu jalovou složku. V praxi je třeba vykompenzovat induktivní charakter zátěže, proto se jako kompenzátor nejčastěji volí kondenzátory nebo synchronní motory, které umí vytvořit oba charakteru jalové energie.

2.1.1 Rotační zařízení

Jako rotační zařízení pro kompenzaci se používá synchronní motor. Magnetizační energie mu je dodávána samotným budícím vinutím, které je napájené ze stejnosměrného proudu. Změní-li se velikost budícího proudu, bude se měnit i velikost účinníku.

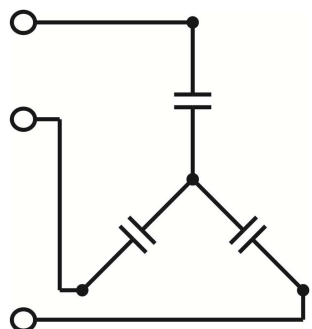


Obrázek 2-1 - V-křivky synchronního stroje [1]

Závislost satorového proudu na budícím proudu při konstantním činném výkonu zobrazují V-křivky na Obrázku 2-1. Účinník lze tedy měnit jak v oblasti induktivní při podbuzeném stavu, tak i v oblasti kapacitní při stavu přebuzeném. Pomocí synchronního motoru lze dosáhnout velkých výkonů (1-15 Mvar), ovšem jejich nevýhodou je pomalá odezva na regulaci. Synchronní kompenzátory nejsou vhodné pro regulaci v sítích obsahující vyšší harmonické, jelikož nejsou zdrojem ani filtrem vyšších harmonických. Tyto zařízení se tedy používají jako centrální kompenzace velkých průmyslových sítí. V rozvodnách jsou připojeny na vysoké napětí o hodnotě 6 kV. Aby se zajistil co nejmenší činný výkon, jsou synchronní stroje provozovány v chodu naprázdno.[1]

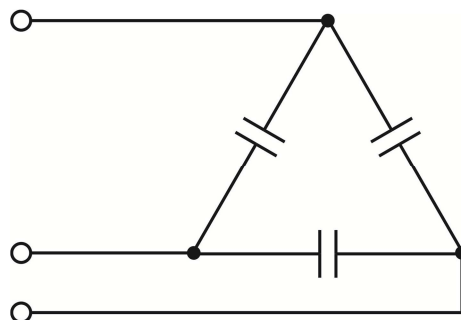
2.1.2 Statické kompenzátory

Ve většině kompenzačních zařízení se používají statické kompenzační baterie. Pro kompenzaci třífázové soustavy je třeba zapojit kondenzační baterie do hvězdy, nebo do trojúhelníka. Potřebné parametry kondenzátorů pro jednotlivá zapojení jsou odvozena níže.



Obrázek 2-2 - zapojení do Y

$$\begin{aligned}
 X_{CY} &= \frac{U_F}{I_C} \\
 \frac{1}{\omega \cdot C_Y} &= \frac{\frac{U_S}{\sqrt{3}}}{I_C} \\
 \frac{1}{\omega \cdot C_Y} &= \frac{U_S}{\sqrt{3} \cdot I_C} \\
 C_Y &= \frac{\sqrt{3} \cdot I_C}{\omega \cdot U_S} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$



Obrázek 2-3 - zapojení do D

$$\begin{aligned}
 X_{CD} &= \frac{U_S}{I_{CF}} \\
 X_{CD} &= \frac{U_S}{\frac{I_C}{\sqrt{3}}} \\
 \frac{1}{\omega \cdot C_D} &= \frac{\sqrt{3} \cdot U_S}{I_C} \\
 C_D &= \frac{I_C}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot U_S} \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

Dáme-li kapacity do poměru dostaneme:

$$\frac{C_Y}{C_D} = 3 \quad (2.3)$$

Z poměru (2.3) je vidět, že pro zapojení do hvězdy (Y) je potřeba použít třikrát větší kondenzátor, než kdyby byly zapojeny kondenzátory do trojúhelníka (D).

Kompenzační jalový výkon Q_C určíme podle vztahu (2.4):

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad (2.4)$$

Připojíme-li 3f kondenzátor na napětí, bude mít jalový výkon Q_C :

- **Pro zapojení do D:**

$$Q_C = 3 \cdot \omega \cdot C_D \cdot U^2 \quad (2.5)$$

Za C_D dosadíme ze vztahu (2.2) a poté si vyjádříme napětí U_S z (2.2) a opět dosadíme:

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot I_C \cdot \frac{I_C}{C_D \cdot \sqrt{3} \cdot \omega} = \frac{I_C^2}{C_D \cdot \omega} \quad (2.6)$$

- **Pro zapojení do Y:**

$$Q_C = 3 \cdot \omega \cdot C_Y \cdot U^2 \quad (2.7)$$

Za C_Y dosadíme ze vztahu (2.1) a poté si vyjádříme napětí U_S z (2.1) a opět dosadíme:

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot I_C \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_C}{C_Y \cdot \omega} = \frac{3 \cdot I_C^2}{C_Y \cdot \omega} \quad (2.8)$$

Ovšem nevýhodou zapojení do trojúhelníka je, že kondenzátor musí být dimenzován na sdružené napětí. Při zapojení do hvězdy je na kondenzátoru pouze fázové napětí, které je o $\sqrt{3}$ menší.[1,10]

Výhodou kondenzátorů je, že nejsou vystaveny mechanickému namáhání a mají při malých pořizovacích nákladech velkou účinnost. Jejich nevýhodou je, že na nich po odpojení zůstává náboj. Proto je třeba kondenzátory vybit přes vybíjecí odpor, který je v nich většinou integrován. Pro co nejděší životnost kondenzátorů, je nutné dodržet několik požadavků:

- Nesmí být překročena doporučená provozní teplota. Při vysoké teplotě dochází ke zrychlené degradaci dielektrika, a tím se krátí jeho životnost.
- Musí být dodržovány štítkové hodnoty napětí, aby se zabránilo vzniku přepětí.
- Použití vhodného regulátoru, který bude dodržovat čas vybíjecí pauzy.[1,9]

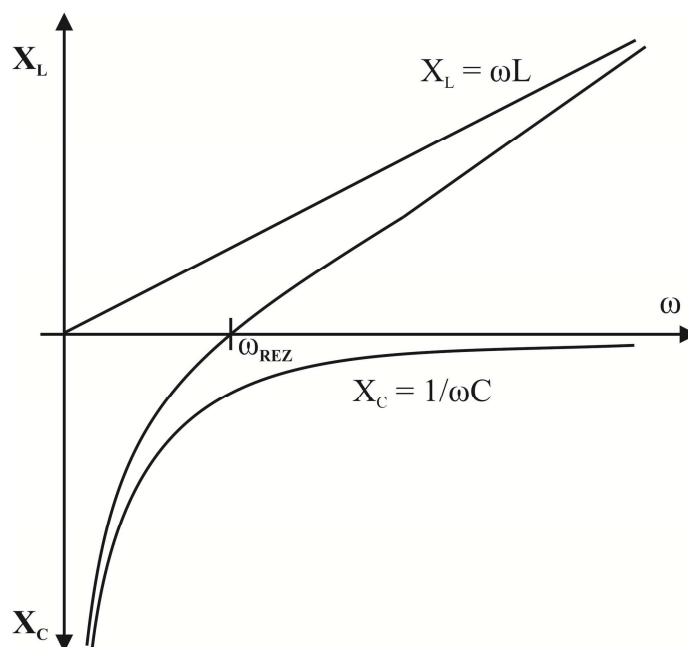
Popis konstrukce vyráběných kondenzátorů pro NN a VN je uveden v kapitole 4.

Použití samotných kondenzátorů pro kompenzaci je možné pouze u sítí, kde se nevyskytuje velké množství vyšších harmonických. To znamená, že by instalovaný výkon nelineárních spotřebičů neměl být vyšší, než 15% celkového instalovaného výkonu.[2] Vzniklý přechodový jev je omezován pouze přidáním vyšší impedance pomocí připínání speciálním kondenzátorovým stykačem, který obsahuje dvě sady kontaktů

(viz kapitola 4.4.1).

2.2 Hrazená kompenzace

V současné době je k řízení pohonů používána polovodičová technologie. Ta má za následek výskyt vyšších harmonických v síti. Pro frekvence vyšších harmonických má kondenzátor nízkou reaktanci. Tím by kondenzátorem protékal i proud vyšších harmonických, který by jej přetěžoval. Při nechráněné kompenzaci dochází ke vzniku sériové rezonance mezi reaktancí sítě a kompenzačním kondenzátorem. Kdyby byl tento rezonanční kmitočet blíže roven některé vyšší harmonické, docházelo by k proudovému i napěťovému přetížení kondenzátoru. Zabránit těmto rezonancím lze použitím ochranné tlumivky, která přeladí sériový obvod na jiný kmitočet, než jsou kmitočty vyšších harmonických.



Obrázek 2-4 – Sériové spojení kompenzačního kondenzátoru a tlumivky [2]

Je-li zapojena ke kondenzátoru do série tlumivka, posune se rezonanční frekvence na nižší hodnotu, než je velikost frekvence vyšších harmonických. Vzniklý LC filtr se pro základní harmonickou chová jako kondenzátor (Obrázek 2-4) a pro kmitočty nad rezonanční frekvencí se chová jako indukčnost, která chrání před vstupem vyšších harmonických.

U hrazené kompenzace se kondenzátory dimenzují na vyšší jmenovité napětí, neboť díky přidané indukčnosti se provozní napětí zvýší.[2]

2.2.1 Pasivní filtry

Sériový obvod LC lze využít nejen jako kompenzační stupně s ochranou před proudy vyšších harmonických. Nastaví-li se rezonance obvodu na frekvenci shodnou s některou harmonickou, dojde k vyfiltrování dané harmonické z obvodu. Použití pasivních filtrů je především tam, kde je síť ovlivněna konkrétními vyššími harmonickými. V praxi se jedná především o kompenzování indukčních pecí.

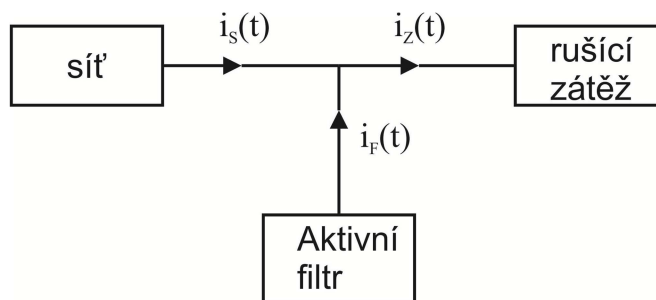
Jelikož v praxi není obvykle instalován pouze jediný filtr, ale skupina filtrů, kde je každý laděn na jinou frekvenci. Musí být dobře nastaven systém spínání jednotlivých filtrů. Jako první je třeba sepnout filtr naladěný na nejnižší kmitočet a zároveň ho vypínat jako poslední. Kdyby se nedodrželo pořadí a došlo nejdříve k sepnutí filtru pro nejvyšší harmonickou. Byl by tento filtr pro nižší řády harmonické, které nejsou připojeny, kapacitní reaktancí, a tak by mohlo dojít k nežádoucí paralelní rezonanci s reaktancí napájecí sítě. Tento stav způsobí zvýraznění některých harmonických, a tak dojde k velké deformaci napětí.[5]

2.2.2 Aktivní filtry

Aktivní filtry se začaly prosazovat až s nástupem výkonových polovodičových součástek především používaných IGBT tranzistorů. Výhodou těchto filtrů je, že kromě kompenzace jalového výkonu, odstraňují vyšší harmonické proudy i napětí. Podle toho jak jsou aktivní filtry zapojeny do obvodu, lze vylepšit parametry proudu, napětí nebo obojího.[5]

Paralelní aktivní filtr:

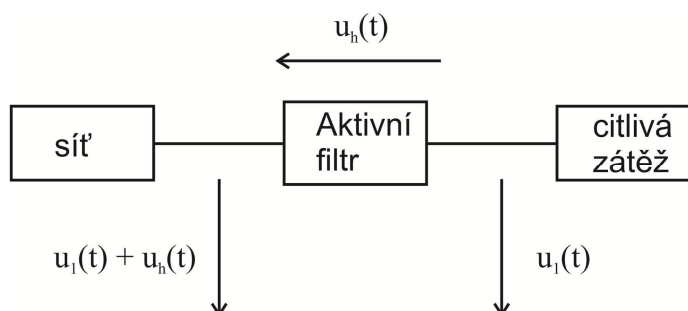
Paralelní aktivní filtr (Obrázek 2-5) je tvořen generátorem proudu zapojeným paralelně k zátěži. Generátor proudu generuje shodné složky vyšších harmonických způsobené rušivou zátěží, ale opačného směru. Tím dojde ve společném uzlu k vyrušení daných vyšších harmonických proudů. Paralelní aktivní filtry upravují vlastnosti sítě směrem od rušivé zátěže ke zdroji a jsou určeny pro kompenzaci deformačního výkonu.[2,5]



Obrázek 2-5 – Paralelní aktivní filtr [2]

Sériový aktivní filtr:

Sériový aktivní filtr se zapojuje mezi svorky sítě a svorky spotřebiče. Je tvořen generátorem napětí. Ten generuje v protifázi nežádoucí harmonická napětí. Ta se opět navzájem odečtou s nežádoucími harmonickými, které jsou obsaženy v síti. Filtr umožňuje udržet amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky a zajistit symetrické rozložení sítě. Sériový aktivní filtr se využije při napájení zátěže, která je citlivá na kvalitu napájecího napětí (Obrázek 2-6). Ze sítě jsou proto odebrány všechny vyšší harmonické a do zařízení vstupuje pouze základní harmonická.



Obrázek 2-6 - Sériový aktivní filtr [2]

K tomu, abychom zajistili kvalitní tvar napětí v místě připojení filtru a zároveň zajistili definovaný odebíraný průběh proudu, je možné použít kombinovaný filtr složený ze sériového a paralelního filtru.[2,5]

2.3 Regulátory jalového výkonu

Jsou zařízení, které umožňují řídit velikost účinníku prostřednictvím přepínání jednotlivých kompenzačních stupňů. Velikost účinníku vyhodnocují na základě vzájemného fázového posunu měřeného proudu a napětí. Porovnáním velikosti změřeného a požadovaného účinníku spíná požadovaný počet kompenzačních stupňů. Regulátory se používají tam, kde se velikost účinníku v čase mění. Pokud je třeba vykompenzovat jeden motor, není třeba použít regulátor.

2.3.1 Starší typy regulátorů

Dříve pracovaly regulátory na principu elektroměru. Často používaným byl regulátor typu WOR. Otočný kotouč se otáčel takovým směrem, jaký charakter výkonu byl zjištěn. Otáčení kotouče způsobovalo spínání, nebo rozpínání pomocných relé, které ovládaly jednotlivé kompenzační stupně. Otáčení probíhalo do té doby, než velikost účinníku dosáhla požadované hodnoty.

Modernějším nástupcem byli analogové elektronické regulátory označované RQ. Ovšem ani ty už se v dnešní době nepoužívají a jsou nahrazovány mikroprocesorovými regulátory.[2]

2.3.2 Moderní regulátory účinníku

S nástupem mikroprocesorové techniky se začali vyrábět regulátory, které plně řídí celý regulační proces. Regulátory dovedou zaznamenávat, jak kvalitně byla kompenzace provedena, a tak se dá snadno vyhodnotit ekonomičnost kompenzace. Další výhodou je hlídání doby, nezbytné pro vybití kondenzátoru, před jeho dalším sepnutím. Též dovedou měřit dobu sepnutí jednotlivých stupňů, a tak zajistit stejné opotřebení všech kondenzátorů. Podrobnější popis mikroprocesorových regulátorů vyskytujících se na trhu je v kapitole 4.

3 Měření kompenzace pomocí regulátoru NOVAR 1312

Úkolem měření je ověřit teoretické předpoklady týkající se kompenzace pro dva druhy zátěže. Konstantní zátěž jalové energie bude představovat třífázový olejový transformátor v chodu naprázdno. Dále bude kompenzována zátěž, při které se bude jalový výkon v závislosti na čase měnit. Tuto zátěž bude realizovat autotransformátor, na jehož výstupní svorky bude připojen třífázový asynchronní motor. Jako regulátor bude použit NOVAR 1312 společně se spínacím tyristorovým modulem KATKA. Dalším úkolem je spočítat ideální velikost kompenzační baterie pro požadovaný účinník $\cos \varphi = 0,98$.

3.1 Popis měřených elektrických strojů

3.1.1 Transformátor

K rozvodu elektrické energie je třeba měnit velikost napětí, aby byl přenos energie co nejméně ztrátový. K tomuto účelu slouží transformátor. Jednofázový transformátor se skládá z magnetického obvodu a dvou vinutí. Ke své funkci potřebuje vytvořit magnetický obvod, jehož vznik je podmíněn odběrem jalové energie. Jelikož bude transformátor připojen ve stavu naprázdno, bude odebírat převážně jalovou energii a jeho účinník bude malý. V praxi se snažíme mít transformátor zatížen v rozmezí (60 – 80%). Při malém zatížení by byl malý účinník. Naopak při velkém zatížení vznikají v transformátoru velké Joulovy ztráty, a proto se navrhuje větší, než by bylo výkonově třeba.

Měřený transformátor má tyto štítkové hodnoty:

- Typ: 3fázový, TK 46A
- Výkon: $S = 10 \text{ kVA}$
- Zapojení: hvězda – 380 V, trojúhelník – 120 V
- Frekvence: $f = 50 \text{ Hz}$

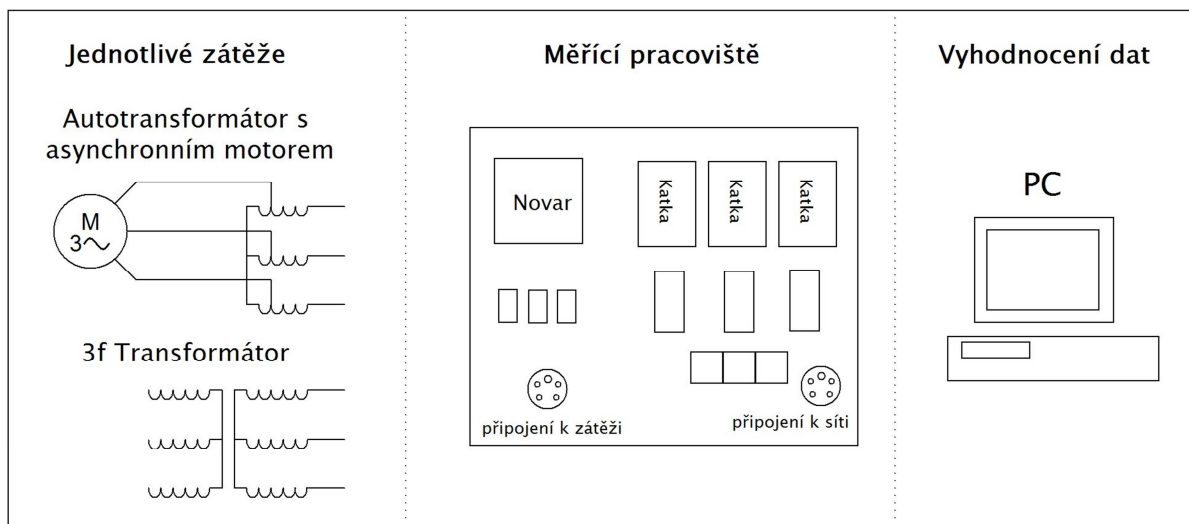
3.1.2 Autotransformátor zatížen asynchronním motorem

Asynchronní motor je nejčastějším spotřebičem elektrické energie v průmyslu. Ke své funkci potřebuje odebírat kromě činné složky energie i složku jalovou. Velikost jalové složky tvoří impedance statoru, rotoru a hlavní impedance, která charakterizuje magnetický obvod. Je-li motor jmenovitě zatížen, pohybuje se jeho účinník v rozmezí 0,6 – 0,9. Účinník se zvyšuje se jmenovitým výkonem elektromotoru. Další vliv na jeho velikost má počet pólů. Čím více má elektromotor pólů, tím jeho účinník klesá. Nejhorší účinník má motor v chodu naprázdno. V tomto stavu spotřebovává převážně jalovou energii. Proto se motory navrhnou tak, aby byl využit celý jejich výkon.[1]

Asynchronní motor má tyto štítkové hodnoty:

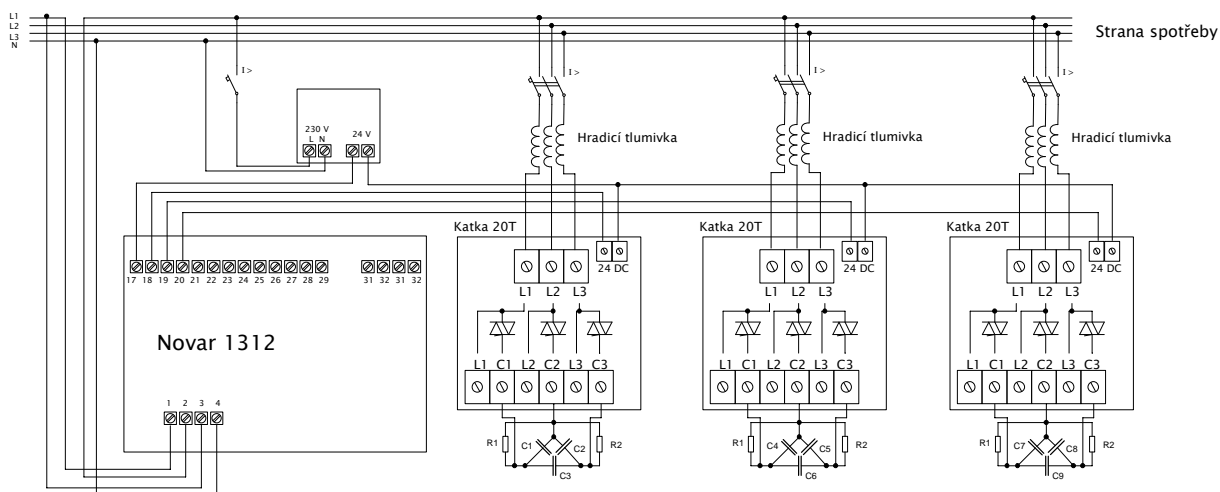
- Typ: AP112M/4
- Výkon: $P = 4 \text{ kW}$
- Zapojení: hvězda/trojúhelník – 380/220 V
- Frekvence: $f = 50 \text{ Hz}$

3.2 Schéma zapojení



Obrázek 3-1 - Blokové schéma zapojení

Prázdné bloky u měřicího pracoviště, které nejsou popsány ve schématu, představují hradící tlumivky, kondenzátory, jističe a vybíjecí odpory. Podrobné zapojení měřicího pracoviště je nakresleno níže na Obrázku 3-2.



Obrázek 3-2 - Schéma zapojení měřicího pracoviště

3.3 Výsledky měření

V nastavení regulátoru NOVAR 1312 jsem nastavil požadovaný účinník na hodnotu $\cos \varphi = 0,98$. K regulátoru byly připojeny 3 kondenzační stupně, každý o hodnotě 1,23 kvar. Jeden kompenzační stupeň tvořili 3 kondenzátory zapojené do trojúhelníka, každý o hodnotě 8,25 μF .

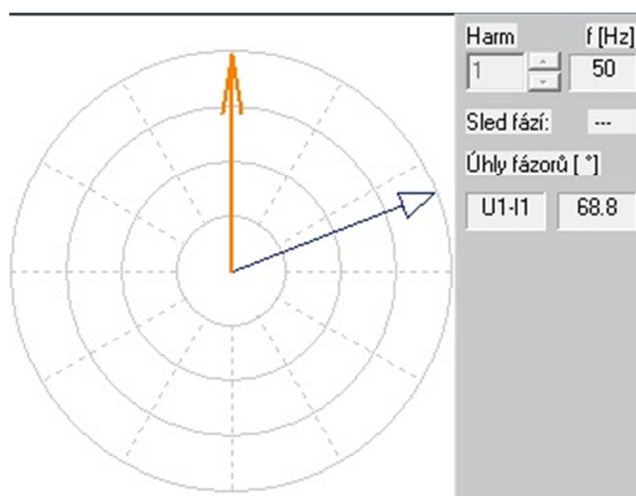
3.3.1 Statická zátěž

Třífázový transformátor ve stavu naprázdno jsem připojil na trojfázovou síť. Nejprve jsem připojil transformátor k regulátoru bez kondenzačních baterií, abych mohl změřit velikost účinníku při chodu naprázdno. Poté jsem připojil kondenzační baterie. Regulátor sepnul pouze jednu z nich, a tím vylepšil účinník na co nejlepší možnou hodnotu účinníku, která šla vytvořit z připojených kondenzátorů k regulátoru. Naměřené hodnoty zobrazuje Tabulka 3-1.

	$\cos \varphi$ [-]	P [W]	Q [var]	I_{eff} [A]	I_{rea} [A]
bez kompenzace	0,36	586	1514	2,41	2,21
s kompenzací	0,91	554	250	0,99	0,36

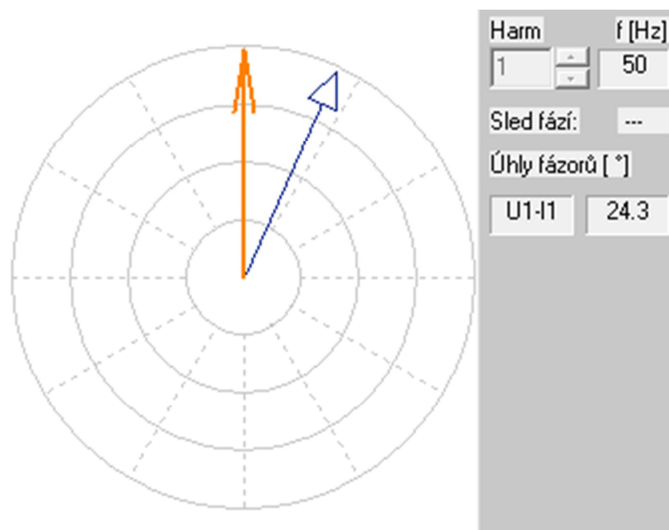
Tabulka 3-1 - kompenzace transformátoru

Jalový výkon byl snížen o hodnotu jednoho kondenzačního stupně (1,23 kvar). Jelikož byly kompenzační stupně vzhledem k dané zátěži velké, nemohlo dojít k vykompenzování účinníku na požadovanou nastavenou hodnotu $\cos \varphi = 0,98$. Při sepnutí dalšího stupně by totiž došlo k překompenzování, což je nežádoucí stav.



Obrázek 3-3 - Fázorový diagram nevykompenzovaného transformátoru

Fázorový diagram nevykompenzovaného transformátoru (Obrázek 3-3), vykreslený programem RETIS ukazuje úhel mezi napětím a proudem $68,8^\circ$. Použijeme-li funkci cosinus, která definuje účinník, vyjde nám změřená hodnota účinníku $\cos \varphi = 0,36$.



Obrázek 3-4 - Fázorový diagram vykompenzovaného transformátoru

Po vykompenzování (Obrázek 3-4) vidíme, že se úhel mezi fázorem proudu a fázorem napětí změnil na hodnotu $24,3^\circ$. Tato velikost není optimální, ovšem sepnutí dalšího kompenzačního stupně by způsobilo překompenzování, což je nežádoucí stav. Řešením tohoto problému by bylo zvolit vhodnější (v tomto případě menší) kompenzační stupně.

Návrh ideální velikosti kompenzační baterie k transformátoru:

Požadovaný účinník:

$$\cos \varphi_k = 0,98 \quad \longrightarrow \quad \varphi_k = 11,5^\circ$$

Změřený účinník bez kompenzování:

$$\cos \varphi = 0,36 \quad \longrightarrow \quad \varphi = 68,9^\circ$$

Potřebná velikost kompenzační baterie pro vykompenzování transformátoru v chodu naprázdno na požadovaný účinník se určí podle vztahu (3.1):

$$Q_{kom} = P \cdot (tg\varphi - tg\varphi_k) = 586 \cdot (tg68,9^\circ - tg11,5^\circ) = 1399 \text{ var} \quad (3.1)$$

Kompenzační baterie je zapojena do D a proto se použije vztah (3.2):

$$C_D = \frac{Q_C}{3 \cdot U^2 \cdot \omega} = \frac{1399}{3 \cdot 400^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 9,28 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (3.2)$$

Velikost jednoho kondenzátoru v baterii zapojené do D by měla být $C_D = 9,28 \mu\text{F}$.

3.3.2 Proměnná zátěž

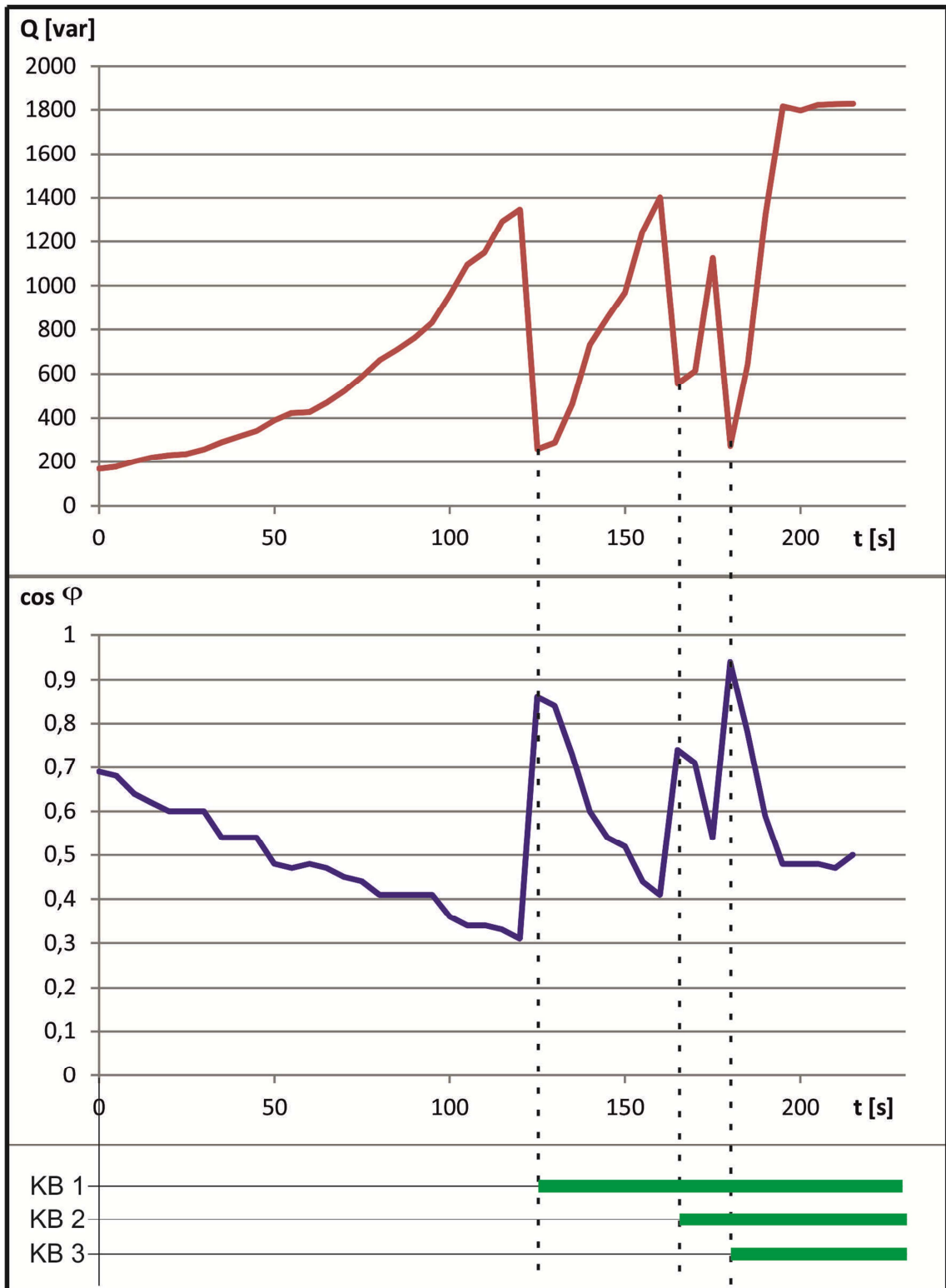
Jako proměnnou zátěž jalového výkonu jsem použil autotransformátor, který reguloval výkon na připojeném třífázovém asynchronním motoru. Napětí na výstupních svorkách autotransformátoru jsem se snažil po malých úsecích rovnoměrně zvyšovat. Asynchronní motor ve stavu naprázdno při zvyšujícím se napětí zvyšoval svůj odběr jalové energie, a tím se horšil jeho účinník. Hodnoty naměřené při kompenzaci autotransformátoru ovládající asynchronní motor jsou vidět v Tabulce 3-2.

	$\cos \varphi$ [-]	P [W]	Q [var]	I_{eff} [A]	I_{rea} [A]
před sep. 1.stupně	0,31	440	1347	2,04	1,99
po sep. 1.stupně	0,86	427	258	0,83	0,38
před sep. 2.stupně	0,41	632	1402	2,39	2,07
po sep. 2.stupně	0,74	614	556	1,73	0,82
před sep. 3.stupně	0,54	724	1125	2,23	1,66
po sep. 3.stupně	0,94	756	273	2,86	0,4
při $U_s = 400$ V	0,5	1051	1828	3,44	2,7

Tabulka 3-2 - Kompenzace pomocí autotransformátoru

Průběh spínání jednotlivých stupňů a tím vliv na velikost $\cos \varphi$ a jalového výkonu je vidět na grafu viz Obrázek 3-5. S regulátorem na autotransformátoru jsem se snažil otáčet s přibližně konstantní rychlostí, aby byl růst napětí v čase lineární.

Data jsou zaznamenána z regulátoru pomocí programu Retis. Nevýhodou tohoto programu je, že dovede zaznamenávat hodnoty po 5 vteřinách. I když jsem se snažil s regulací napětí na autotransformátoru otáčet velice pomalu, grafy vypadají, jako kdyby regulátor spínal vždy při jiné hodnotě účinníku. Tato nepřesnost je právě způsobena 5 vteřinovým intervalem zaznamenávání, a proto přesný bod sepnutí je velice těžké takto zaznamenat. Podstata kompenzace účinníku je ale z grafů patrná. Dosáhne-li jalový výkon takové hodnoty, kdy by se mohl sepnout nejmenší kompenzační stupeň pro dosažení požadovaného účinníku, tak regulátor sepne daný stupeň. Tím se zmenší jalový výkon a tedy i procházející proud.



Obrázek 3-5 - - Průběhy Q a $\cos \varphi$

Návrh ideální velikosti kompenzační baterie k autotransformátoru:

Při maximální velikosti napětí naměřil regulátor jalový výkon $Q = 1828 \text{ var}$ při sepnutých 3 kompenzačních stupních, přičemž každý stupeň měl hodnotu 1,23 kvar.

Požadovaný účinník:

$$\cos \varphi_k = 0,98 \quad \longrightarrow \quad \varphi_k = 11,5^\circ$$

Změřený účinník s použitím daných kompenzačních stupňů:

$$\cos \varphi = 0,5 \quad \longrightarrow \quad \varphi = 60^\circ$$

Potřebná velikost výkonu kompenzační baterie, aby byl splněn požadovaný účinník, se určí podle vztahu:

$$Q_{kom} = P \cdot (tg \varphi - tg \varphi_k) = 3 \cdot 1230 + 1051 \cdot (tg 60^\circ - tg 11,5^\circ) = 5297 \text{ var} \quad (3.3)$$

Kompenzační baterie je zapojena do D a proto se použije vztah:

$$C_D = \frac{Q_C}{3 \cdot U^2 \cdot \omega} = \frac{5297}{3 \cdot 400^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 35,1 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (3.4)$$

Velikost jednoho kondenzátoru v baterii zapojené do D by měla být $C = 35,1 \mu\text{F}$.

3.4 Zhodnocení naměřených výsledků

Měřením jsem ověřil smysl a funkci kompenzace. U transformátoru byla před kompenzací naměřena efektivní hodnota proudu $I_{\text{eff}} = 2,41 \text{ A}$, z toho jalová složka proudu zabírala velikost $I_{\text{rea}} = 2,21 \text{ A}$. Po připojení kompenzační baterie klesla efektivní hodnota proudu na velikost $I_{\text{eff}} = 1 \text{ A}$. Snížení velikosti proudu, který by se zbytečně přenášel napájecím vedením, je v tomto případě o téměř 1,5 A. U asynchronního motoru se zvyšujícím se napětím a konstantní frekvencí roste činný i jalový výkon. Jelikož je asynchronní motor v chodu naprázdno, projevují se hlavně jeho magnetizační vlastnosti, a proto je patrný velký nárůst jalové složky a snížení účinníku. Pokud tedy kompenzujeme zařízení, kde dochází ke změně výkonu, je nutné použít kompenzaci s regulátorem, který zabrání překompenzování při náhlém snížení výkonu.

4 Zařízení ke kompenzaci na trhu

4.1 Regulátory

4.1.1 Regulátory NOVAR

Regulátory NOVAR jsou vyráběny v několika typech. Od nejjednodušších označených 5 RQ, které slouží jako náhrada za staré elektronické regulátory RQ5. Pro méně náročné aplikace je vyráběn regulátor s označením NOVAR 5 a NOVAR 5+. Tyto regulátory obsahují 6 reléových výstupů. Proudový vstup je navržen k připojení měřicího transformátoru proudu s nominální hodnotou sekundárního proudu 5A. Regulátorů NOVAR je vyráběno mnoho typů, aby se pro daný požadavek kompenzace našel regulátor s dostatečnými parametry za co nejnižší cenu. Regulátory se od sebe liší počtem výstupů, obsahem tranzistorových výstupů pro připojení bezkontaktního spínače, rychlostí spínání, možností ovládání a záznamu dat pomocí PC.

Regulátor NOVAR 1312

Na regulátoru NOVAR 1312 je měřena praktická část této práce, a tak zde uvedu jeho popis a parametry. Jedná se o rychlý regulátor vybavený přesným měřicím obvodem pro proud a napětí. Výpočet harmonických složek je prováděn pomocí rychlé Fourierovy transformace. Obsahuje dva regulační procesy rychlý a pomalý. Pomalý regulační proces umožňuje ovládat reléové výstupy pro připojení klasických stykačů. Naopak rychlý regulační proces využívá pouze tranzistorové výstupy, které dokáže spínat s frekvencí 10 Hz. Obsahuje 12 tranzistorových výstupů pro připojení tyristorových modulů a možnost využít tak jeho maximální rychlosti. Jelikož je určen hlavně pro rychlou kompenzaci, obsahuje jen 2 reléové výstupy. Regulátor sleduje dobu a počet sepnutí jednotlivých stupňů, a tak stupně o stejném výkonu stejnoměrně zatěžuje, aby docházelo u všech ke stejnému opotřebení. U jednotlivých stupňů hlídá dobu vypnutí, aby se daný kondenzátor stačil vybit. Pro připojení k PC lze využít sériovou komunikační linku RS-485. K ovládání přes PC je dispozici program RETIS a novější program ENVIS.[6]

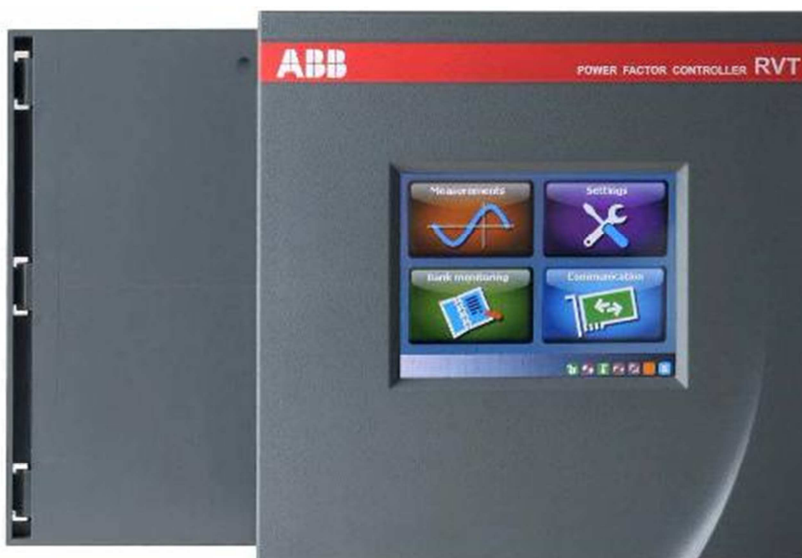


Obrázek 4-1 - Regulátor NOVAR 1312 [6]

4.1.2 Další mikroprocesorové regulátory na trhu

Dalším často používaným regulátorem je německý regulátor **Janitza Prophi**. Lze ho použít v třífázových sítích v nechráněných i chráněných kompenzačních systémech. U proudu a napětí vyhodnocuje jejich liché harmonické a to až do 19. řádu.

Uživatelsky nejpřívětivější jsou moderní regulátory řady **RVT od výrobce ABB**. Jejich ovládání a nastavování parametrů umožňuje dotyková obrazovka na přední straně regulátoru. Právě díky tomuto displeji dovedou kromě hodnoty opravdového účinníku přehledně zobrazit i velikosti jednotlivých harmonických v síti.[13]



Obrázek 4-2 - Regulátor RVT [13]

4.2 Statické kondenzátory

4.2.1 Kondenzátory pro NN

Kondenzátory pro nízké napětí v poslední době zažili několik vylepšení. Dříve se v kondenzátorech používala dielektrika s kapalným impregnantem, což byl většinou speciálně upravený olej. Tyto kondenzátory byly postupně nahrazeny impregnantem gelovým u něhož už nehrozilo v případě havárie kondenzátoru průsak či vytečení do okolí.

V dnešní době jsou na trhu kondenzátory v suchém provedení. Na trhu se vyskytují v hliníkových válcových nádobách a jsou samohojitelné. To znamená, že při průrazu dielektrika, což se může stát například u krátkodobého napěťového přetížení, dojde během několika milisekund k odpaření elektrod v oblasti průrazu a obnovení izolační pevnosti. Při tomto jevu se uvolní plyn, který se hromadí v nádobě. Pokud dochází k častým průrazům, dojde k přetlaku v nádobě a poruší se přetlaková pojistka, která zajistí samočinné odpojení kondenzátoru od sítě.[1]

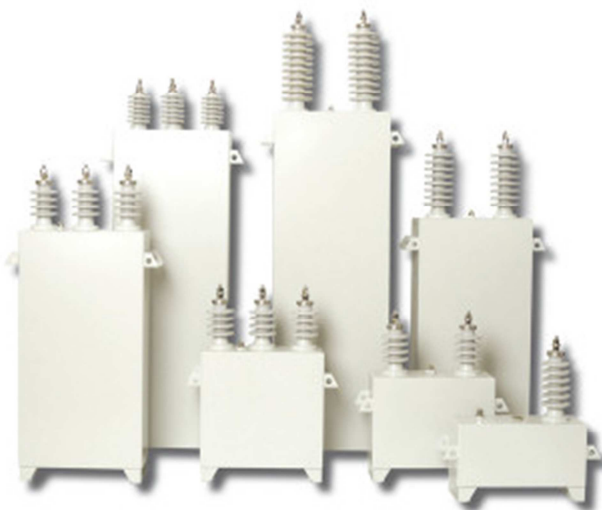
Výrobou a distribucí výkonových kondenzátorů se v naší republice zabývá společnost ZEZ Silko, s.r.o.. Kondenzátory pro NN vyrábí ve dvou systémech MKP a MKV. Zkratkou MKP jsou označeny kondenzátory v suchém provedení bez olejové náplně. Jsou vyrobeny z jednostranně pokoveného polypropylénového filmu. Systém MKV tvoří elektrody oboustranně pokovený papír a jako dielektrikum je opět použita PP fólie. Celý systém kondenzátoru MKV je impregnován minerálním olejem. Kondenzátory MKV jsou vyrobeny pro vyšší výkonové i tepelné zatížení.[11]



Obrázek 4-3 - Kondenzátory pro NN [11]

4.2.2 Kondenzátory pro VN

U kondenzátorů pro vysoké napětí tvoří dielektrikum také polypropylenová fólie. Ta je ovšem impregnována syntetickou kapalinou nazývanou Jarylec. Tato kapalina je zdravotně i ekologicky nezávadná. Elektrody jsou vyrobeny z hliníkové fólie. Tyto kondenzátorové jednotky obsahují i vybíjecí odpory, které sníží napětí na kondenzátoru do 10 minut na 75V.[12]



Obrázek 4-4 - Kondenzátory pro VN [12]

4.3 Měřicí transformátor proudu

Jelikož kompenzačním zařízením může procházet velký proud je třeba pro jeho měření použít měřicí transformátor proudu (MTP). MTP se skládá z magnetického obvodu, který se nasune na kabel, kterým prochází daný měřený proud. Na magnetickém obvodu je sekundární vinutí, ke kterému se sériově připojí ampérmetr. MTP pouze zvětšuje měřicí rozsah ampérmetru. Další výhodou měřicího transformátoru proudu je elektrické oddělení mezi měřeným a měřícím obvodem.



Obrázek 4-5 - Násuvný měřicí transformátor proudu [14]

4.4 Tlumivky

Při výskytu vyšších harmonických je nutné použít hrazenou kompenzaci (viz kapitola 2.2). Používané tlumivky jsou vyráběny z měděného vinutí a jsou vybavené tepelnou ochrannou pojistkou, která má zabránit jejímu přehřátí a zničení. Nejčastější provedení tlumivek je třífázové a jsou standardně laděny na frekvenční kmitočet 189 Hz. Tlumivky slouží k omezení amplitudy proudových rázů, ochraně kompenzačních kondenzátorů před vyššími harmonickými. Další jejich výhodou je, že umí zabraňovat odsávání kmitočtu HDO z rozvodné sítě.[15]



Obrázek 4-6 – Kompenzační (ochranné) tlumivky [15]

4.5 Spínací zařízení

K sepnutí kompenzační baterie lze využít klasického stykače. Ty ovšem nejsou schopny vyhovět dnešním požadavkům na rychlou kompenzaci, a tak jsou nahrazovány polovodičovými spínacími prvky.

4.5.1 Stykače

Ke spínání kondenzátorů pro kompenzaci slouží speciální kondenzátorové stykače. Kromě hlavních spínacích kontaktů jsou tyto stykače vybaveny speciálními prekontakty. Prekontakt, někdy nazýván předstihový kontakt, je tvořen pomocným tlumícím odporem, který zajišťuje ochranu kondenzátoru před proudovými špičkami. Tyto proudové špičky, které

mohou dosáhnout i 200 násobku jmenovitého proudu, by na kontaktech způsobovali jejich napalování, a tak by došlo k rychlému opotřebení. Při sepnutí jsou nejdříve spojeny prekontakty, které pomohou utlumit proudový náraz. Po určité době (řádově ms) se spojí hlavní kontakty a prekontakty se automaticky rozpojí.

Na trhu jsou stykače s navrhovanou životností až 30000 sepnutí. Omezení těchto stykačů je v počtu sepnutí za hodinu. Hodnota tohoto parametru se pohybuje kolem 240 sepnutí za hodinu. Na trhu se vyskytují kondenzátorové stykače VIVO a stykače Benedikt&Jäger.[16]



Obrázek 4-7 - Kondenzátorový spínač Benedikt&Jäger [16]

4.5.2 Bezkontaktní spínací prvky

Pro požadavky na rychlejší regulaci a tedy zároveň častější spínání kondenzátorů než jsou navrhovány stykače, se musí použít bezkontaktního spínání. V praktické části měření byl použit tyristorový spínací modul KATKA značky KMB. Tento modul je navržen pro spínání s rychlostí až 20 zásahů za sekundu. V současné době se vyrábí 2 typy těchto modulů, které se liší pouze maximálním procházejícím proudem. Nevýhodou u těchto bloků je, že se nesmí překročit jejich mezní parametry. Na rozdíl od stykačů zde i malé překročení proudu může znamenat okamžité zničení. Proto je nutné tyto moduly zapojovat pouze v chráněné kompenzaci, tedy s ochrannými tlumivkami, které případnou špičku proudu omezí na dovolenou hodnotu. Výhodou těchto prvků je nulové rušení, protože dovedou spínat při průchodu nulou.[7]



Obrázek 4-8 - Tyristorový spínací modul KATKA [7]

4.6 Kompenzační rozvaděč

Pro skupinovou a centrální kompenzaci celých průmyslových sítí se obvykle veškeré kompenzační zařízení umísťuje do samostatného kompenzačního rozvaděče. Jištění tohoto rozvaděče musí být provedeno pomocí pojistkového odpínače. Výjimku tvoří kompenzační rozvaděč, který je umístěn hned vedle hlavního rozvaděče a napájen z jeho prodloužených již jištěných přípojníc.[1] Rozvaděče jsou vyráběny z oceloplechových skříní s minimálním stupněm krytí IP40.[17] Ukázka skříňového rozvaděče je na Obrázku 4-9.



Obrázek 4-9 - Ukázka kompenzačního rozvaděče [17]

5 Závěr

Jelikož vzrůstá počet spotřebičů, které ke své funkci potřebují jalovou energii, bude kompenzace účinníku i nadále důležitou podmínkou odběru elektrické energie. Jak lze vidět z výsledků měření v kapitole 3.4. Kompenzováním účinníku můžeme ušetřit vzniku zbytečných ztrát přenosem jalového proudu. Vzárustem počtu polovodičových výkonových součástek pro řízení velkých pohonů, se v síti vytváří velké množství vyšších harmonických. V těchto případech je nutné ke kompenzačnímu kondenzátoru připojit ochrannou tlumivku, případně použít vhodné zapojení filtru (viz kapitola 2.2 Hrazená kompenzace).

Požadovaná hodnota účinníku se většinou pohybuje v rozmezí od 0,95 do 1 induktivního charakteru. Pokud by tuto hodnotu firmy nedodržovali, hrozí jim pokuty od distribučních společností. Z toho vyplývá, že pořízením kompenzace ušetří jak firma, která nemusí platit přírůstek za špatný účinník, tak distribuční společnosti, kterým nebudou vznikat vyšší ztráty na vedení a zároveň dosáhnou lepšího využití transformátorů, které není vhodné zatěžovat na plný výkon.

V praktické části jsem ověřil teoretické poznatky týkající se kompenzace účinníku. U konstantní zátěže jalového výkonu, kterou představoval transformátor v chodu naprázdno, se ušetřilo vedení od přenosu jalového výkonu o velikosti 1,23 kvar. Tím se snížil proud o 1,4 A. U zátěže, kde se jalový výkon s časem měnil, bych zdůraznil potřebu správně navržených kompenzačních stupňů, které by vhodnou kombinací dosáhly co nejbližší požadované velikosti účinníku. V mém případě byly ke kompenzační stanici připojeny kondenzační stupně o výkonu 1,23 kvar. Tato velikost kondenzačních stupňů v tomto případě byla natolik velká, že hodnota účinníku, než se mohl sepnout další stupeň, aby nedošlo k překompenzování, klesala k hodnotám účinníku kolem 0,4. Proto by bylo dobré připojit další kompenzační baterii například s polovičním výkonem.

V poslední kapitole jsou uvedeny příklady zařízení ke kompenzaci, které jsou na trhu v současné době k dispozici. Největším vývojem prošly regulátory účinníku, které jsou řízeny mikroprocesorem, a tak je lze naprogramovat na hlídání kteréhokoliv měřeného parametru a na výpočet dalších potřebných údajů. Velký rozvoj zažívají také aktivní filtry, na nichž se projevuje vývoj výkonových polovodičových součástek.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KORENC, Vladimír. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1999, 127 s. ISBN 80-862-3007-4.
- [2] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [3] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. VŠB-TU Ostrava: MONTALEX a.s., 2008. ISBN 978-80-7225-291-6.
- [4] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-730-0164-0.
- [5] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 195 s. ISBN 80-708-2976-1.
- [6] Dokumentace automatického regulátoru jalového výkonu Novar 1312, [online], KMB SYSTEMS, [Cit. 25.2.2013]
Dostupné z: <http://www.kmb.cz/index.php/cs/regulatory-ucinniku/fast-pfc-novar-1312>
- [7] Dokumentace tyristorového spínacího bloku KATKA 20 T, [online], KMB SYSTEMS, [Cit. 25.2.2013]
Dostupné z: <http://www.kmb.cz/index.php/cs/regulatory-ucinniku/katka-20-80>
- [8] Kompenzace jalového výkonu. *KBH ENERGY s.r.o.* [online]. 2007 [cit. 2013-04-24].
Dostupné z: <http://www.kbh.cz/kompenzace/zaklady-kompenzace>
- [9] KOMPENZACE JALOVÉ ENERGIE. [online]. 2013 [cit. 2013-04-24].
Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/customZone/files/pfcnew.pdf>
- [10] TYRBACH, Jaromír. *Materiály k předmětu EEN* [online]. Ústí n. L., Resslova 5. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://web.telecom.cz/tyrbach/een.htm>
- [11] Kompenzační kondenzátory NN. *ZEZ SILKO, s.r.o.* [online]. [cit. 2013-04-24].
Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/produkty/kompenzacni-kondenzatory-nn>
- [12] Kompenzační kondenzátory VN. *ZEZ SILKO, s.r.o.* [online]. [cit. 2013-04-24].
Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/cs/produkty/kompenzacni-kondenzatory-vn>
- [13] Regulátor účinníku RVT. *ABB* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/seitp329/33e2d7dee75df2a6c125716100359f58.aspx?productLanguage=cz&country=CZ>
- [14] GHV Trading. *Násuvné měřicí transformátory proudu* [online]. [cit. 2013-05-31].
Dostupné z: <http://www.ghvtrading.cz/rozsadecove-pristroje/transformatory-proudu/merici-nasuvne/>

- [15] DNA Energie s.r.o. *Kompenzační tlumivky* [online]. [cit. 2013-05-31]. Dostupné z:
<http://www.dna.cz/energie/kompenzacni-tlumivky/kompenzacni-ochranne>
- [16] KBH ENERGY. *Kondenzátorové stykače Benedikt&Jäger* [online]. [cit. 2013-05-31].
Dostupné z:
<http://www.kbh.cz/stykace-a-tyristory/kondenzatorove-stykace-benediktjager>
- [17] K&V Elektro. *Rozvaděče Emcos* [online]. [cit. 2013-05-31].
Dostupné z: <http://www.kvelektro.cz/sortiment/rozvadece/emcos/>