

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
TECHNICKÁ FAKULTA



**PASIVNÍ VÝKONY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ
A JEJICH VLIV NA ÚČINÍK ODBĚRATELE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Monika Hromasová, Ph.D

Vypracoval: Miloslav Misterka

PRAHA 2012

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: Technická
Katedra: elektrotechniky a automatizace	Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Misterka Miloslav**

Studijní obor: Obchod a podnikání s technikou

Název práce: Pasivní výkony v elektrizační soustavě a jejich vliv na účinník odběratele

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Cílem bakalářské práce je analýza pasivních výkonů v elektrizační soustavě.

Osnova práce:

1. Pasivní výkony v elektrizační soustavě.
2. Kompenzace účinníku.
3. Možnosti eliminace vlivu na účinník odběratele.
4. Zhodnocení a závěr.

Metodika práce: Rešerše na téma pasivní výkony v elektrizační soustavě České republiky. Popsat vliv na účinník odběratele a zhodnotit možnosti eliminace vlivu na účinník.

Rozsah práce: 30-40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

Kolektiv: Měření, regulace a kompenzace elektrické energie. Kozlovice: Závodný
Elektro, 2004, s. 40.

Odborné časopisy, firemní literatura, katalogy, internet.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Monika Křečková

Datum zadání bakalářské práce: 30. 11. 2008

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 4. 2010



prof. Ing. Zdeněk Bohuslavěk, CSc.

vedoucí katedry

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

děkan

V Praze dne 15.1.2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v citované literatuře. Další informace mi poskytli pracovníci technické údržby Národního divadla v Praze.

V Praze, dne 23.3.2012

.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu diplomové práce Ing. Monice Hromasové, Ph.D. za její odborné konzultace a připomínky k mé práci, dále bych chtěl poděkovat panu Julku Krajčovi, za odborné rady a poskytnutí informací ohledně kompenzační stanice Národního divadla v Praze.

Abstrakt

Práce je věnovaná pasivním výkonům a jejich vlivu na elektrizační soustavu. V první části práce je objasněna základní teorie jejich vzniku a následné působení v síti. Další část je věnovaná základní eliminaci těchto výkonů v rozvodných soustavách, zejména pak kompenzaci účinníku a jeho vlivu na technologické a ekonomické prostředky odběratele. V následné a závěrečné části práce je demonstrována názorná ukázka základní kompenzace pasivních výkonů, která byla provedena laboratorním pokusem.

V bakalářské práci jsou popsány základní teoretické vztahy výkonů s ohledem na odpor, indukčnost a kapacitu. Čtenář by po přečtení této práce měl získat základní znalosti v oblasti elektrických výkonů a následně by měl pochopit, co je to kompenzace jalového výkonu a co se děje v elektrické soustavě po zohlednění těchto tří výše zmiňovaných veličin.

Klíčová slova

Elektrický výkon, odběratel, účinník, kompenzace jalového výkonu

Summary

This bachelor thesis is about passive powers and their influence to electricity system. In the first part of this thesis is illustrated basic theory of formation and their subsequent activities of the network. Next part is devoted to basic elimination of these powers in distribution systems, especially power factor compensation and its influence to technological and economic medium of customer. In the last part of the thesis is described demonstration of basic compensation passive powers, which was performed by a laboratory experiment.

In bachelor thesis are described basic theoretical relationships of powers with regard to electrical resistance, inductance and capacity. The reader should get elementary knowledges in electric powers and then should understand, what reactive power compensation is and what is happening in the electrical system after taking into account these above-mentioned physical quantities.

Key words

Electric power, customer, power factor, reactive power compensation

Obsah

Úvod.....	1
Cíl práce a metodika	2
1 Pasivní výkony v elektrizační soustavě	4
1.1 Činná složka výkonu	5
1.2 Jalová složka výkonu	6
1.3 Zdánlivý výkon	8
1.4 Distorzní výkon.....	8
1.5 Pulzační výkon	10
2 Kompenzace účinníku.....	11
2.1 Obecná charakteristika zdroje	11
2.1.1 Aktivní výkon	11
2.1.2 Stejnoseměrný odpor	11
2.1.3 Kapacita	12
2.1.4 Indukčnost.....	13
2.2 Výkony ve spotřebiči vzhledem ke kompenzaci.....	13
2.2.1 Činné spotřebiče	14
2.2.2 Reaktanční spotřebiče	14
2.2.3 Vlastní princip kompenzace.....	16
2.3 Účinník	18
2.4 Kvalita elektrické energie	19
3 Možnosti eliminace vlivu na účinník odběratele	20
3.1 Principy kompenzace účinníku odběratele.....	20
3.2 Technické prostředky kompenzace	20
3.3 Způsoby řízení kompenzačního výkonu	21
3.4 Zásady pro navrhování kompenzačních stanic	22
3.5 Složení kompenzační stanice	22
3.6 Možnosti kompenzace jalového výkonu.....	24
3.7 Příklad kompenzační stanice v praxi.....	24
4 Praktická ukáзка základní eliminace pasivních výkonů.....	25
4.1 Laboratorní pokus kompenzace jalového výkonu.....	25
4.1.1 Činná zátěž.....	26
4.1.2 Připojený kondenzátor	27
4.1.3 Připojený transformátor	27
4.1.4 Vlastní pokus:	28
4.2 Laboratorní pokus simulace distorzního výkonu	31

5	Zhodnocení a závěr.....	35
6	Citovaná literatura.....	37
7	Seznam obrázků.....	38

Úvod

Pasivní výkony patří mezi největší záhady elektrotechniky, zabývá se jimi spousta článků a publikací. Základní otázkou týkající se pasivních výkonů, zejména výkonu jalového se zabývali fyzikové koncem 19. století, když zkoumali fázový posun mezi napětím a proudem s ohledem na užitečný elektrický výkon. Myšlenka vyrovnávat fázový posun mezi napětím a proudem pomocí kondenzátoru přišla pravděpodobně z Anglie a to v roce 1892.

Světlo světa spatřil pojem „Power Factor“ případně „Blindleistung“ v letech 1913 až 1920. Čeští elektrotechnikové si tento výraz přejmenovali na „jalový výkon“, tudíž neplodný. Mezinárodní dohody o definici elektrického výkonu bylo dosaženo v roce 1930 na zasedání IEC¹ v Norsku [2].

Pasivní výkony ze své podstaty jsou tak trochu „přítěží“, a proto se snažíme snížit jejich vliv na elektrizační soustavu. Obecně lze říci, že pasivní výkony v elektrizační soustavě dělíme na tři základní složky. První složka vykonává elektrickou práci za jednotku času, která se obvodem přelívá tam a zpět a způsobuje v části periody zápornou hodnotu okamžitého proudu. V praxi to znamená, že elektrická energie v jedné části periody vytváří elektrické či magnetické pole podle charakteru zátěže a v druhé části periody pak tato pole zanikají [3]. Tato první složka pasivního výkonu se nazývá jalová. Druhá složka pasivního výkonu se objevuje jako důsledek harmonických proudů, které mají za následek zvýšené ztráty Joulovým teplem vlivem hysterezních a vířivých proudů vyšších harmonických. Tato druhá složka se nazývá distorzní a elektrizační soustavu zatěžuje nesinusovými proudy. Třetí složka se nazývá pulzační a je způsobena zpětnou složkou proudu první harmonické frekvence.

Snížení vlivu pasivních výkonů v elektrizační soustavě docílíme návrhem vhodných kompenzačních stanic, které nejenom vykompenzují jalový výkon, ale také sníží vliv distorzního a pulzačního výkonu v elektrizační distribuční soustavě.

¹ Mezinárodní elektrotechnická komise

Cíl práce a metodika

Práce je rozdělena do dvou částí. První část je teoretická rešerše, kde jsou využity převážně metody popisu a charakteristiky jednotlivých veličin a druhá část je praktická ukázka eliminace pasivních výkonů a jejich následné vyhodnocení.

Cílem teoretické části práce je charakteristika problematiky pasivních výkonů a jejich analýza s ohledem na působení v rozvodné soustavě. Následně je v práci popsán vliv jalového výkonu na účinník odběratele a zhodnocení možností, jak tento vliv eliminovat v důsledku technických a ekonomických hledisek.

Cílem praktické části je snaha demonstrovat eliminaci pasivního výkonu názorným pokusem v laboratorních podmínkách a také ukázka vlivu pasivního výkonu na elektrický obvod a to při působení rušivých jevů vyšších harmonických složek proudů.

Celkovým cílem bakalářské práce bylo jednak popsání pasivních výkonů a jejich vliv na odběratele z hlediska jejich kompenzace a také snaha poukázat na závažnost působení některých z nich v elektrizační soustavě, z hlediska jejího přetěžování dynamickými proudy. Tato skutečnost má zejména poukázat na problematiku rozvoje polovodičových spínacích prvků, a to zejména na důsledné zajištění filtrace vyšších harmonických složek napětí a proudu vzniklé jejich provozem.

První kapitola pojednává o výkonech v elektrizační soustavě. Zabývá se jejich rozdělením, popisem základních fyzikálních vztahů a jejich působení v rámci soustavy.

Druhá kapitola pojednává o kompenzaci účinníku, jsou zde charakterizovány veličiny, které ovlivňují účinník z hlediska jejich působení ve spotřebiči elektrického proudu. Následně je zde popsán vlastní princip kompenzace s ohledem na kvalitu elektrické energie.

Třetí kapitola se věnuje možnosti eliminace vlivu účinníku na odběratele a to formou využití technických prostředků kompenzace vzhledem k návrhu kompenzačních stanic a následnému způsobu jejich řízení. V této kapitole je uvedena a popsána kompenzace v kompenzační stanici Národního divadla v Praze.

Ve čtvrté kapitole je praktická ukázka základní kompenzace pasivních výkonů, kde je laboratorním pokusem nasimulován elektrický obvod v induktivním charakteru,

který je následně kompenzován soustavou kondenzátorů. Tento pokus je demonstrován i z hlediska grafického výkladu, kde je vidět fázový posun mezi napětím a proudem. V druhé praktické ukázce jde o simulaci vlivu pasivních výkonů na elektrický obvod se zapojeným čtyřmístkovým usměrňovačem. V této ukázce je snaha demonstrovat vliv vyšších harmonických složek napětí a proudu na elektrický obvod.

Hodnocení a závěr je věnován tradičně souhrnu celé problematiky týkající se oblasti pasivních výkonů a následné pohlednutí do vývoje jednotlivých prvků kompenzačních zařízení. V závěru je charakterizována jaká si vize, aneb co nás čeká v oblasti eliminace pasivních výkonů v blízké budoucnosti.

Materiály a podklady pro bakalářskou práci jsem sháněl převážně z webových stránek zabývajících se tematikou okolo kompenzace účinníku, zejména jsem navštěvoval stránky wikipedie nebo webtelecomu a stránky, kde publikují vývojový pracovníci z výzkumného střediska EMCOS Teplice. Velkým přínosem byla pro mě i publikace s názvem „Kompenzace jalového výkonu v praxi“, kde jsem našel spousty odpovědí na různé otázky týkající se eliminace jalového výkonu.

Obrázky a grafy jsou převážně vlastní tvorby a v případě převzetí z jiné literatury, je u nich uveden zdroj původu.

1 Pasivní výkony v elektrizační soustavě

Pasivními výkony v elektrizační soustavě jsou složky napětí a proudu, které nikterak nevykonávají „skutečnou“ práci, ale jsou podpůrnou součástí pro vytvoření prostředí v obvodech s kapacitním a induktivním charakterem. Jejich velikost je nutné v elektrizační soustavě regulovat na potřebné množství a tato regulace je označena jako kompenzace klasického účinníku². Některé pasivní výkony jsou dokonce natolik nežádoucí, že jejich vlivem dochází k vysokým tepelným ztrátám a v praxi to znamená, že pokud nedojde k jejich eliminaci, tak těmto výkonům vystavené zařízení se musí mnohásobně předimenzovávat.

Pasivní výkony jsou součástí komplexních výkonů, složených z činné a jalové složky. Tato komplexní nebo také zdánlivá složka výkonů se v elektrizační soustavě nazývá elektrický výkon.

Elektrický výkon je fyzikální veličina, která vyjadřuje množství práce vykonané za jednotku času [1] a dělíme ho na střídavý a stejnosměrný.

Stejnoseměrný výkon se spočítá jako součin napětí a proudu, což lze vyjádřit i také jako změnu elektrického náboje při daném napětí:

$$W = U \cdot I \cdot t; \quad P = \frac{W}{t}; \quad P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t}; \quad P = U \cdot I \quad [W, V, A, s] \quad (1)$$

Kde:

P: elektrický výkon

U: napětí

t: čas

Střídavý výkon se spočítá v základu jako stejnosměrný s doplněním o fázový posun mezi napětím a proudem.

Ve střídavých obvodech oproti stejnosměrným se neustále mění okamžité hodnoty napětí a proudu a tudíž se mění i okamžitá hodnota výkonu, která je daná součinem okamžitých hodnot obou složek:

Střídavý výkon dělíme na dvě základní složky:

- Složku činnou (aktivní)
- Složku jalovou (pasivní)

² kosinus fázového posunu mezi napětím a proudem [5]

1.1 Činná složka výkonu

Činná složka výkonu tzv. činný výkon sice nepatří mezi pasivní výkony, ale úzce s nimi souvisí. Můžeme ji charakterizovat jako výkon ideálního rezistoru s odporem R a za takový spotřebič lze případně považovat žárovku nebo topné těleso. Činná složka výkonu je vždy kladná, protože rezistor energii pouze odebírá a přeměňuje ji na jinou formu energie.

Pokud je napětí a proud ve fázi, lze činnou složku charakterizovat pouze jako součin efektivních hodnot napětí a proudu.

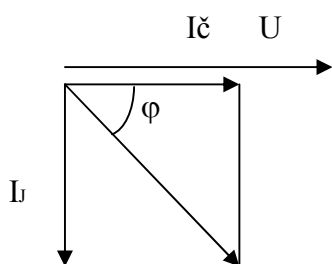
Efektivní hodnota označována také jako RMS (kvadratická střední hodnota) je rovna hodnotě stejnosměrného proudu, který by při průchodu odporovou zátěží dával stejný tzv. průměrný výkon, a je dána stření hodnotou výkonu P za dobu kmitu T , kolem které vzniká okamžitý výkon, který leží v polovině maximálního výkonu P_M [3]. Poté lze maximální výkon vyjádřit vztahem:

$$P_M = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sqrt{2} \cdot I \quad [W, V, A] \quad P = \frac{1}{2} \cdot P_M \quad [W, W,] \quad (2)$$

$$P = U \cdot I \quad [W, V, A] \quad (3)$$

V obvodech pro obecnou zátěž (impedanci), lze činnou složku proudu vyjádřit vztahem:

$$\cos \varphi = \frac{I_{\check{c}}}{I} \quad [A, -] \quad I_{\check{c}} = I \cdot \cos \varphi \quad [A, -] \quad (4)$$



obrázek 1 – Fázový diagram [3]

Pokud se jedná o výpočet činného výkonu obecné impedance, je nutné za proud dosadit hodnotu proudu, která je ve fázi s napětím.

$$P = U \cdot I_{\check{c}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [W, V, A, -] \quad (5)$$

Za U a I dosazujeme efektivní hodnoty napětí a proudu, úhel φ je nulový, tudíž dle goniometrických funkcí je $\cos \varphi = 1$. V tomto případě obecná impedance činného výkonu má jalovou složku rovnou nule *obrázek 1*.

1.2 Jalová složka výkonu

Jalová složka výkonu tzv. jalový výkon lze charakterizovat, jako výkon ideálního kondenzátoru s reaktancí X_C nebo jako výkon ideální cívky s reaktancí X_L .

Reaktanci lze zjednodušeně charakterizovat jako odpor zařízení induktivního nebo kapacitního charakteru, přesněji je to imaginární část impedance, kterou představuje komplexní veličina popisující zdánlivý odpor a fázový posun mezi napětím a proudem při dané frekvenci. Při určení jalového výkonu, pokud se nezabýváme vnitřními ztráty kondenzátoru nebo cívky, se složka ideálního rezistoru zanedbává a počítá se pouze s kapacitou a indukčností [4].

Kapacitu nám určuje ideální kondenzátor, který si lze představit jako akumulátor elektrického náboje, kterým v obvodech střídavého proudu prochází proud, který je dán vztahem:

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} \quad [I, V, \Omega] \quad X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad [\Omega, Hz, F] \quad (6)$$

Kde:

I_C : proud kondenzátoru

U_C : napětí kondenzátoru

f : frekvence

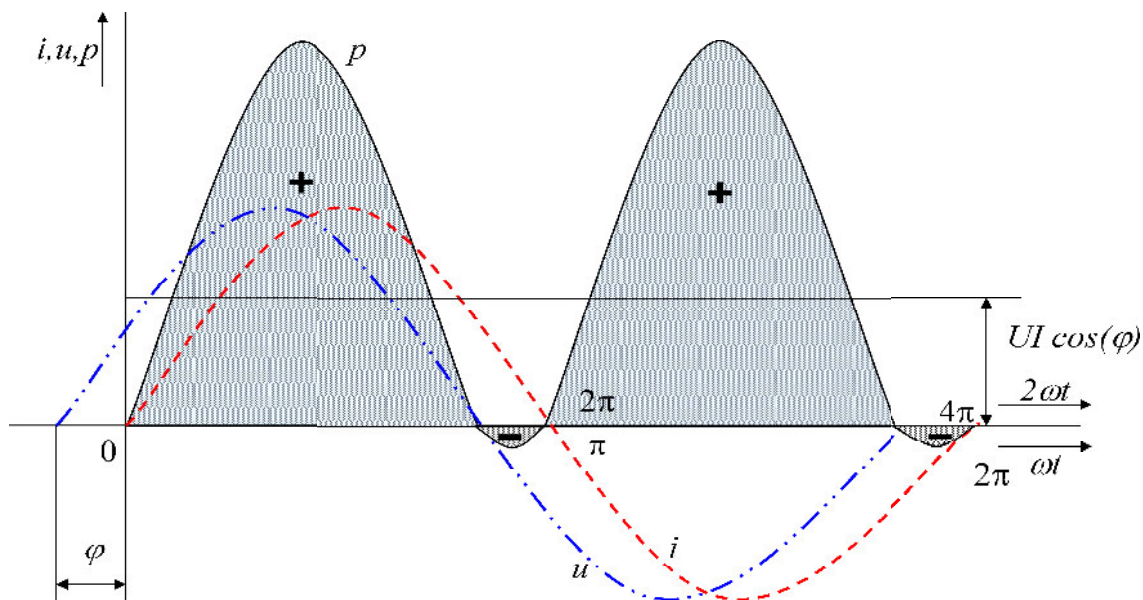
C : kapacita

X_C je kapacitní reaktance, nebo-li odpor kondenzátoru udávaný v ohmech. Ze vztahu (7) je zřejmé, že čím větší je kapacita nebo frekvence, tím větší proud kondenzátorem prochází. Proud tekoucí ideálním kondenzátorem³ předbíhá napětí o $\pi/2$ (90°). Pro vysoké kmitočty se chová kondenzátor jako zkrat. Kapacitu C uvádíme ve faradech. Indukčnost určuje ideální cívka, v níž vlivem působení elektrického proudu se vytváří magnetické pole, které indukuje napětí a platí, že indukované napětí působí svými účinky proti změně, která jej vyvolala, tudíž ve střídavém obvodu cívka klade odpor, ale nikoliv jen činný, ale i zdánlivý. Tento odpor se nazývá induktivní reaktance [4], značí se X_L a je dána vztahem:

$$U = I \cdot X_L \quad X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad [\Omega, Hz, H] \quad (7)$$

Zjednodušeně si to lze představit jako Ohmův zákon pro ideální cívku, kde za R dosadíme složku X_L . Aby mohl cívku procházet proud, je třeba, aby napětí vytvořilo magnetické pole. Napětí proud předchází o $\pi/2$ (90°) a reaktance lineárně roste s frekvencí, kdežto proud je frekvenci nepřímo úměrný.

³ prvek, kterým prochází pouze jalová složka proudu

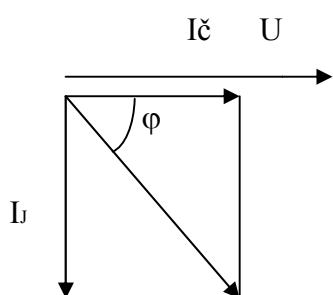


obrázek 2 – Výkon harmonického proudu v obvodu s induktivním charakterem [8]

Na obrázku 2 je vidět vliv indukčnosti v obvodu střídavého proudu, kde napětí předchází proud o úhel φ . Výkon harmonického proudu je činný v kladné půlplně a jalový v záporné půlplně. Velikost jalového proudu je přímo závislá na úhlu posunutí křivky napětí oproti proudu.

Kladné a záporné hodnoty výkonu znamenají, že ideální cívka v jedné čtvrt periodě energii ze zdroje odebírá a v následující čtvrt periodě jí zase vrací do zdroje. Magnetické pole cívky vzniká a zase zaniká. Totéž platí i pro kapacitu s tím rozdílem, že v ideálním kondenzátoru nevzniká magnetické pole, ale kondenzátor se pouze nabíjí a vybíjí elektrickým nábojem.

Jalová složka proudu lze vyjádřit též jako průmět proudu do osy „y“ obrázek 3 a lze ji vyjádřit vztahem:



$$\sin \varphi = \frac{I_j}{I} \quad [-, A, A] \quad I_j = I \cdot \sin \varphi \quad [A, A -] \quad (8)$$

Pokud se jedná o výpočet jalového výkonu obecné impedance je nutné za proud dosadit hodnotu proudu, která je vůči napětí posunuta o 90° . Jalový výkon má značku Q a jeho jednotkou je voltampér reaktanční (var). Pro jalový výkon platí vztah:

obrázek 3 – Fázový diagram [3]

$$Q = U \cdot I_j = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{var}, \text{V}, \text{A}, -] \quad (9)$$

Stejně tak jako u činného výkonu dosazujeme do vzorce efektivní hodnoty napětí a proudu. Veškerý výkon ideálního kondenzátoru nebo cívky je jalový, neboť $\varphi = 90^\circ$, tudíž $\sin \varphi = 1$. V tomto případě je výkon rovný násobku efektivních hodnot napětí a proudu.

Činný výkon ideálního kondenzátoru nebo cívky je nulový, neboť platí, že $\varphi = 90^\circ$, tudíž $\cos \varphi = 0$.

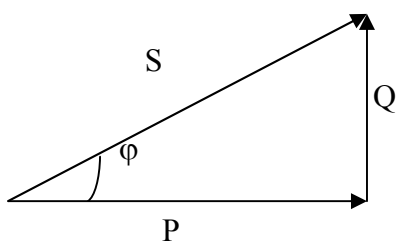
1.3 Zdánlivý výkon

Zdánlivý výkon je charakterizován jako součin středních efektivních hodnot napětí a proudu a vyjadřuje se podle pravoúhlého trojúhelníku výkonů vztahem:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (10)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{U^2 \cdot I^2 \cdot \cos^2 \varphi + U^2 \cdot I^2 \cdot \sin^2 \varphi} = \sqrt{U^2 \cdot I^2 \cdot (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} = U \cdot I \sqrt{(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} \quad (11)$$

$$S = U \cdot I \quad [\text{VA}, \text{V}, \text{A},] \quad (12)$$



obrázek 4 – Výkonový trojúhelník

Zdánlivý výkon má značku S a jeho jednotkou je voltampér (VA). Tento výkon není skutečný, ale pouze pojem, který určuje poměr obou složek činného a jalového výkonu jak je možné vidět na *obrázku 4*.

1.4 Distorzní výkon

Distorzní výkon uvažujeme v případě výskytu vyšších harmonických proudů v elektrické síti, jako důsledek nelineárních spotřebičů. Tento výkon je tvořen zdánlivým výkonem harmonických proudových složek a je dán vztahem:

$$D = U \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad [VA, V, A,] \quad (13)$$

Kde:

D : *distorzní (deformační) výkon*

$\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2$: *suma proudů vyšších harmonických*

Pokud promítneme distorzní složku do zdánlivého výkonu, tak pak dostáváme:

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (14)$$

Kde S_1 je zdánlivý výkon v jednotkách VA ve kterém je zahrnuta složka vyšších harmonických, která má za následek větší ztráty Joulovým teplem v železe, které jsou úměrné čtverci zdánlivého proudu, to např. znamená, že jeden ampér druhé harmonické způsobuje stejné ztráty vířivými proudy, jako dva ampéry základní frekvence. Celkové ztráty v železe jsou rovny součtu ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy [5].

Distorzní výkon vznikl s vývojem polovodičů, spínaných zdrojů a dalších typů zařízení pracujících na principu polovodičového spínání. Přidáním distorzního výkonu do kompenzace, lze mluvit o tzv. opravdovém účinníku $\cos \lambda$. Tento účinník v sobě zahrnuje vliv harmonických složek napětí a proudu [2].

Důvodem požívání těchto zařízení je skutečnost, že provozováním jader na mnohem vyšší pracovní frekvenci, než je 50Hz v síti, dosáhneme například značné úspory na železe ve feromagnetickém obvodu použitého transformátoru. Se zvyšující se pracovní frekvencí feritového obvodu vzrůstá přenášený výkon.

Vstupní část těchto zařízení vždy obsahuje jedno, nebo třífázový usměrňovač s výstupní filtrační kapacitou. Toto usměrňené a galvanicky neoddělené napětí sítě se potom dále zpracovává zpravidla pomocí pulzně šířkové modulace za použití IGBT tranzistorů.

Důvodem vzniku distorzního výkonu, tj. deformujícího výkonu, je právě vstupní obvod, usměrňovač s kapacitou.

Tato vstupní kapacita se vždy nabíjí v oblastech nejvyššího napětí sinusoidy. V těchto oblastech také odebírá proud. Jinak řečeno, kapacita se nabíjí na maximální napětí sinusoidy v okamžicích, kdy aktuální napětí sinusoidy převyšuje napětí aktuální, na které je nabitá filtrační kapacita. V tomto okamžiku je nabíjející proud v podstatě

omezen pouze impedancí obvodu, která je složena z impedance vstupních filtrů a impedancí sítě. Otevřená dioda má vnitřní impedanci prakticky zanedbatelnou.

Čili z tohoto teoretického rozboru vyplývá, že po připojení filtrační kapacity na zatížený usměrňovač se silně mění charakter a průběh vstupního proudu. Tento proud již z principu nemůže mít sinusový tvar. To znamená, že sinusovku zatěžuje nerovnoměrně, neharmonicky a prakticky nejvíce v oblastech její amplitudy. Díky tomuto stavu jsou „vršky“ sinusovky jakoby „ořezané“. Tímto stavem vzniká nežádoucí zkreslení a deformace sinusovky.

Na vstupech těchto zařízení bývají osazeny, dle kvality zařízení, více či méně jakostné filtry. Obvody, které tento distorzní, deformační proud max. eliminují.

Základní princip těchto filtrů lze vysvětlit na principu funkce tlumivky zařazené do série se spotřebičem, která svým principem veškeré rychlé změny proudu potlačuje a tím pádem je potlačován i částečně neharmonický průběh. Pro lepší potlačení harmonických průběhů se do obvodu s tlumivkou vybavují kondenzátory, které mohou např. tvořit rezonanční obvody pro vybrané kmitočty (zejména oblast okolo HDO^4 apod.) a tím lze docílit selektivnějšího filtrování neharmonických průběhů. Pasivní filtry mají obecně nevýhodu útlumu ostatních nefiltrovaných složek při přenosu, a tím je jejich použití mnohdy značně omezeno.

1.5 Pulzační výkon

Pulzační výkon je daný zpětnou složkou proudu, která vzniká při nesouměrném zatížení statoru točivého stroje, jako například při výpadku jedné fáze u třífázového motoru.

Zpětná složka proudu vlivem indukce dvojnásobného kmitočtu vytváří magnetické pole, otáčející se dvojnásobnou rychlostí opačného charakteru. Toto má za následek vytvoření zpětného magnetického pole a tím ohřívání rotoru vířivými proudy. Pulzační výkon je nežádoucí a odstraňuje se vložením ochrany proti nesymetrickému zatížení, kde principem je měření zpětné složky proudu a následné vypnutí spotřebiče od elektrické sítě po překročení stanovené meze působení zpětného proudu.

⁴ Hromadné Dálkové Ovládání – vysokofrekvenční signál v distribuční soustavě za účelem ovládní některých zařízení spravovaných energetickými závody

2 Kompenzace účinníku

V obecném slova smyslu se jedná o eliminaci pasivního výkonu v obvodu nebo v rozvodné či elektrizační soustavě. Tento výkon je pro činnou práci nežádoucí a svým charakterem nepřímo zatěžuje obvod nebo rozvodnou soustavu, a proto je snahou ho eliminovat na přípustnou mez danou energetickým zákonem.

2.1 Obecná charakteristika zdroje

Každý spotřebič lze specifikovat podle charakteru, jakým se chová v síti a jak tu síť zatěžuje. Tuto specifikaci lze vyjádřit podle zastoupení tří složek.

- Činné odporové
- Jalové kapacitní
- Jalové induktivní

2.1.1 Aktivní výkon

Teorie tohoto výkonu je rozebrána v úvodu práce, nyní tento výkon bude popsán vzhledem ke spotřebiči. Jedná se o činnou složku, která zatěžuje síť reálným výkonem. Výkonem, který koná skutečnou práci ... topí, svítí, vytváří krouticí moment na hřídelích motorů apd. Jedná se tedy o výkon žádoucí. O výkon, kvůli kterému vlastně spotřebiče provozujeme, a který se nutně musí z elektrorozvodné sítě odebrat. Jednotka činného výkonu je Watt.

V praxi se však ukazuje, že spotřebiče, (měřený jednoduchou metodou ampérmetr, voltmetr a jejich součin), odebírají větší proud a tím pádem zatěžují síť více než by měly, a to vzhledem k reálné práci, kterou vykonávají. Samozřejmě i s ohlédnutím na účinnost spotřebiče.

Je nutné rozlišovat mezi tzv. výkonem zdánlivým (VA), tj. výkonem, který dostaneme součinem napájecího napětí a proudu a výkonem, respektive příkonem, který by spotřebič měl i s ohledem na účinnost odebírat. Ukázalo se také, že tuto disproporci je možné eliminovat a podstatně tak snížit zatížení elektrorozvodné sítě.

2.1.2 Stejnoseměrný odpor

Každý spotřebič lze charakterizovat tzv. činným odporem. Je to elektrický odpor spotřebiče, který je dán množstvím a kvalitou použitého vodiče. Tato veličina se měří

při stejnosměrném napětí a proudu a to z důvodu vyloučení ostatních složek, které by ovlivňovali měření. Zejména se jedná o reaktivní odpor kapacitního a induktivního charakteru. Do obvodu se pustí stejnosměrný proud o určité velikosti a měřením se zjistí, jaký způsobí úbytek napětí. Dále dle Ohmova zákona se vypočte stejnosměrný odpor spotřebiče.

Vzhledem k tomu, že standardní spotřebič se skládá mimo jiné hlavně z určité délky drátu určitého průřezu a určitého materiálu, lze tuto hodnotu poměrně snadno vypočítat podle následujícího vztahu:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega, \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}^2] \quad (15)$$

Kde:

R : výsledný odpor vedení

k : konstanta materiálu, tzv. rezistivita, nebo-li měrná vodivost

l : délka použitého vodiče

S : průřez použitého vodiče

Jenom pro úplnost je nutné říci, že hodnota rezistivity je závislá na teplotě materiálu a každý spotřebič, lze charakterizovat stejnosměrným elektrickým odporem.

2.1.3 Kapacita

Kapacita úzce souvisí s konstrukcí spotřebiče a lze ji charakterizovat elektrickým polem, které vzniká mezi dvěma vodiči, deskami, prakticky mezi čímkoliv, co je alespoň trochu elektricky vodivé. Připojíme-li mezi tyto části elektrické napětí, vzniká mezi nimi elektrické pole. Zároveň se projevuje základní vlastnost kapacity vázat el. náboj.

Základní vztah pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru je:

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{l} \quad [F, \text{m}^2, \text{m}] \quad (16)$$

Kde:

C : výsledná kapacita

\epsilon : konstanta materiálu, tzv. permitivita (je to součin tzv. relativní permitivity a permitivity vákua)

l : vzdálenost mezi deskami

S : průřez použitých desek

Ze vzorce je zřejmé, že kapacita je dána materiálem, plochou a vzdáleností. Vzhledem k velmi nízké hodnotě kapacity, nízkému pracovnímu kmitočtu 50kHz, je vliv kapacity natolik malý, že ji ve výpočtech i v reálných účincích lze zanedbat.

je nutné si ale i uvědomit fakt, že každý spotřebič v sobě obsahuje části, které lze popsat mimo jiné i kapacitou. (přívodní kabel, svorky apd.)

2.1.4 Indukčnost

Prochází-li vodičem, svorkou, prakticky čímkoli elektrický proud, vzniká kolem tzv. magnetické pole. Toto pole je popsáno vztahy, jednotkami, lze určit jeho směr.

Indukčnost je jedna ze základních charakteristik většiny spotřebičů. Vyjadřuje schopnost změnit elektrickou energii na energii magnetického pole. Čím větší je indukčnost, tím silnější magnetické pole vznikne, a to při stejné velikosti elektrického proudu.

Základní a jednoduchý vztah pro výpočet indukčnosti cívky je:

$$L = k \cdot \frac{S \cdot N^2}{l} \quad [H, m^2, m] \quad (17)$$

Kde:

L : výsledná indukčnost

k : konstanta materiálu, tzv. permeabilita (je to součin tzv. relativní permeability a permeability vákua)

l : střední délka indukční cívky

S : průřez cívky

N : počet závitů

Je třeba si ale uvědomit, že tento vzorec je jen přibližný. V praxi se používají tzv. empirické vzorce, ve kterých je zanesen faktor, který zohledňuje reálné zkušenosti s naměřenou indukčností pro danou velikost, tvar jádra, cívky apd ...

Ze vztahu je zřejmé, že velikost indukčnosti je opět dána konstrukcí, nejvíce však počtem závitů vodiče ve spotřebiči. Je třeba si pamatovat, že každý spotřebič, již svým principem, musí vykazovat nějakou indukčnost.

Opět platí, že u některých spotřebičů je indukčnost, respektive její vliv vzhledem ostatním parametrům a díky nízké používané frekvenci, natolik malá, že ji zanedbáváme, jak ve výpočtech, tak v reálných účincích.

2.2 Výkony ve spotřebiči vzhledem ke kompenzaci

V prvních kapitolách jsou popsány výkony vzhledem k obecné charakteristice a nyní se práce zabývá vlivem těchto výkonů na spotřebič.

2.2.1 Činné spotřebiče

Jsou to především spotřebiče tepelné, které pro svou činnost nepotřebují magnetické, ani elektrické pole. Pracují na principu tepelných ztrát ve vodiči. Spotřebiče neobsahují magnetické obvody, kapacity ani žádné součásti, které by zatěžovaly síť reaktivním (jalovým) výkonem a jejich jalová složka výkonů je natolik malá, že ji zanedbáváme.

U těchto spotřebičů se využívá známý fakt, že průchodem proudu vodičem dochází k jeho zahřívání a k uvolňování tepla.

Velikost tepelného výkonu je dána vztahem:

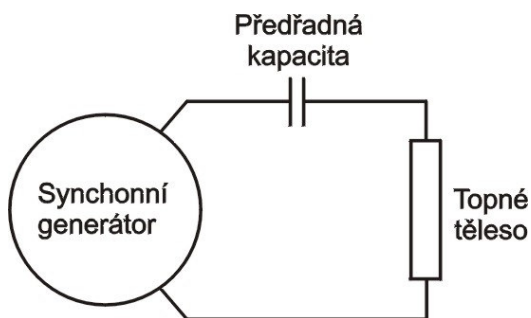
$$P = \frac{U^2}{R} \quad [W, V, \Omega] \quad (18)$$

2.2.2 Reaktanční spotřebiče

Velké množství spotřebičů využívá ke své činnosti magnetické pole. Spotřebiče, které využívají v síti elektrické pole, jsou (kromě kondenzátorů, pokud je ovšem za spotřebiče budeme používat) zastoupeny minimálně.

2.2.2.1 Kapacitní spotřebiče

Ve své praxi jsem se s kapacitním spotřebičem setkal pouze jednou. Jednalo se v podstatě o odporové, topné těleso, které bylo v sérii s kapacitou. Tento modul se pak paralelně připojoval k malé větrné elektrárně. Zde byl jako generátor použit synchronní stroj *obrázek 5*.



Důvodem použití sériové kapacity s tělesem byla potřeba odlehčit generátor elektrárny při nízkých otáčkách, nízké výstupní frekvenci, tj. při malém větru. A to proto, aby došlo k jejímu snadnému rozběhu.

obrázek 5 – Kapacitní spotřebič

Pokud by byla zátěž připojena ke generátoru trvale, bez předřadné kapacity, kladla by rozběhu velký odpor. Generátor by byl natolik zatížen, že při nízkých otáčkách, by pracoval nepravdělně. Generátor by se rozbíhal až při poměrně silném větru.

Zde se využívá fakt, že při nízké frekvenci má kondenzátor vysoký reaktivní odpor, který odlehčil vrtuli, doslova „odpojí“ zátěž.

2.2.2.2 Induktivní spotřebiče

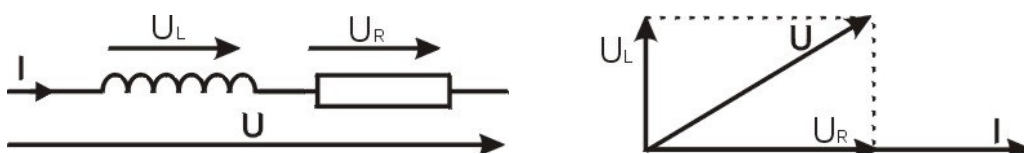
Spotřebiče induktivního charakteru ke své činnosti využívají magnetické pole. Obsahují tedy vždy nějaký feromagnetický obvod. Jedná se především o motory a transformátory.

Spotřebič si lze tedy zjednodušeně nahradit náhradním schématem. Vliv kapacity (přívod, svorky apd.) je zanedbatelný, čili se neuvažuje.

Náhradní schéma musí zahrnovat složku činnou a složku jalovou. Složka činná je zodpovědná za reálný výkon, kvůli kterému spotřebič provozujeme a složka jalová, je nutná k vlastní funkci spotřebiče a pro výrobu magnetického pole.

Náhradní schéma bude proto obsahovat činný a induktivní odpor (induktanci). Po připojení induktivního spotřebiče (transformátor, motor apd.) na stejnosměrné napětí se uplatňuje pouze stejnosměrný odpor. Po připojení střídavého napětí se tento stejnosměrný odpor zvýší o induktivní reaktanci (kvadraticky se sčítá) a s frekvencí se tento celkový odpor, zvaný též impedance zvyšuje.

Z tohoto plyne poznatek, že v náhradním obvodu musí být činná a reaktivní složka sériově. Aby se oba odpory sčítaly jak je vidět na *obrázku 6*.

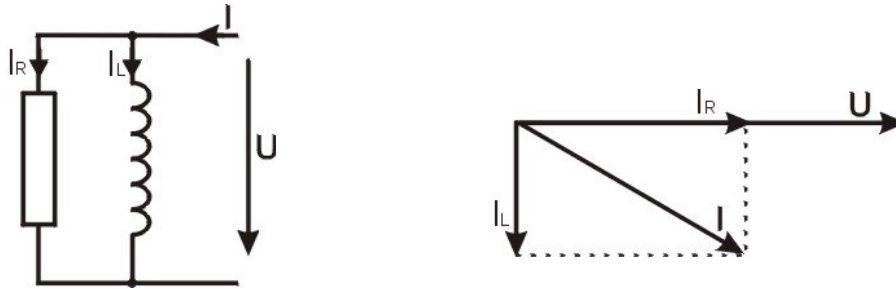


obrázek 6 – Průchod U , I cívkou a rezistorem v serii a vyjádření průběhu ve fázovém diagramu

Z fázového diagramu je zřejmé, že proud procházející činným a reaktivním odporem je stejný. Napětí na činném odporu je ve fázi s procházejícím proudem. Napětí na indukčnosti předbíhá proud o 90° . Vektorový součet těchto napětí je napětí napájecí.

Zaměříme se na dvě veličiny v náhradním schématu induktivního spotřebiče, které jediné lze změřit. A to vstupní napětí a vstupní proud. V podstatě máme dvě veličiny, které spolu svírají nějaký úhel.

Nyní pro zjednodušení výkladu tento dvouhran nahradím dvouhranem jiným, který bude mít ale pro danou frekvenci stejné vlastnosti. Také zde po připojení napětí je naměřen zpožděný průběh proudu o nějaký úhel. Čili pro zjednodušení a přehlednost následujícího výkladu uvádím náhradní schéma indukčního spotřebiče paralelně zapojeným činným a induktivním odporem *obrázek 7*.



obrázek 7 – Průchod U , I cívkou a rezistorem v paralelním zapojení a vyjádření průběhu ve fázovém diagramu

Fázový diagram ukazuje stejně orientované vektory se stejným úhlem. Velikost vektoru je pouze otázkou měřítka.

2.2.3 Vlastní princip kompenzace

V praxi se ukázalo, že paralelním připojením vhodného kondenzátoru k indukčnímu spotřebiči snížíme vstupní proud, aniž bychom ovlivnili činný výkon spotřebiče. Důvody, proč chceme snižovat vstupní proud spotřebiče, jsou čistě ekonomické. Není nutné tolik dimenzovat vedení, ztráty ve vedení i spotřebiči jsou nižší.

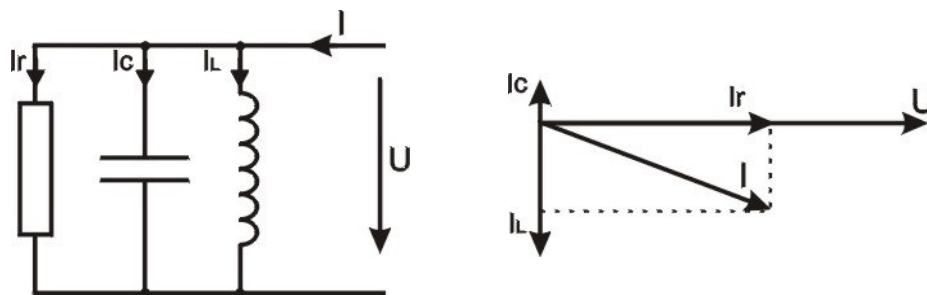
O tom, jak vznikají tepelné ztráty ve vedení, jsem se zmiňoval v kapitole 2.1.2. Princip je stejný i v problematice tepelných spotřebičů.

Z Ohmova zákona je možno jednoduše odvodit vzorec $P = R \cdot I^2$ [W, Ω, A] (19), který ukazuje, jak moc (kvadraticky) jsou ztráty ve vodiči úměrné proudu procházejícím vodičem.

$$P = R \cdot I^2 \quad [W, \Omega, A] \quad (19)$$

Kde:
 P : výkon ztracený na vedení
 I : proud procházející vedením
 R : odpor vedení

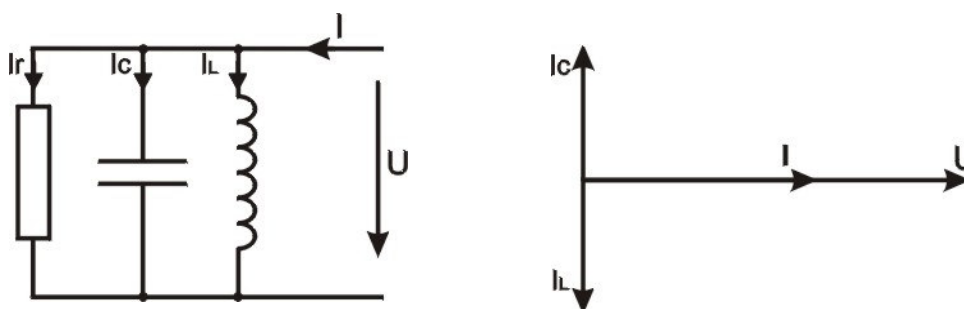
Vlastní kompenzace se provádí (většinou) paralelně připojeným kondenzátorem v obvodu. Na fázovém diagramu je zřetelně vidět, co připojený kondenzátor způsobuje.



obrázek 8 – Schéma jednoduchého kompenzátoru a vyjádření průběhu veličin ve fázovém diagramu

Z diagramu na obrázku 8 je zřejmé, že proud protékající kondenzátorem je odečten z proudu, který odebírá indukčnost a proudy jalový induktivní a kapacitní se vzájemně odčítají. Této vlastnosti právě využívá základní kompenzace jalového výkonu. Elektrorozvodná síť je zatěžována zdánlivým proudem. To je kvadratický součet proudu činného a induktivního.

Jalový proud v síti způsobuje ztráty, síť by se musela na tento proud dimenzovat. Čili paralelně připojenou kapacitou s vhodnou velikostí lze dosáhnout toho, že proud induktivní bude odečten proudem kapacitním, což se ve výsledku projeví menší hodnotou proudu zdánlivého. Ideálně vykompenzováno je v případě, kde napětí a proud jsou ve fázi obrázek 9.



obrázek 9 – Schéma jednoduchého kompenzátoru a vyjádření vykompenzovaného průběhu veličin ve fázovém diagramu

Proud induktivní je vykompenzován stejně velkým proudem kapacitním. Proud zdánlivý je roven proudu činnému. Ze sítě není odebírán žádný proud navíc.

V tomto stavu se prakticky energie kondenzátoru přelévá do energie indukčnosti. Je to v podstatě vzájemné přelévání energií, vzájemná interakce pole elektrického a magnetického.

Situace v obvodu je jednoznačně určena právě úhlem, který spolu svírají vstupní napětí a vstupní proud. Ideální je stav 0° . Účinník je právě \cos tohoto úhlu. Ideální účinník je roven 1.

2.3 Účinník

Účinníkem vyjadřuje fázový posun mezi složky napětí a proudu a rozeznáváme tzv. klasický účinník $\cos \varphi$ a správný účinník $\cos \lambda$, který v sobě navíc zahrnuje parazitní výkony způsobené Joulovými ztráty a zpětnou složkou neharmonických proudů.

V případě kompenzace je snaha zmenšit úhel φ a tím pádem zvětšit účinník. Snahou je odebraný výkon Q_1 snížit na hodnotu Q_2 a tím snížit i zdánlivý výkon S_1 na hodnotu S_2 . Na *obrázku 10* je názorně vidět, jak fázový posun úhlu φ , ovlivňuje velikost jalového výkonu. Kompenzace sníží proud I a činný výkon i po kompenzaci zůstává nezměněn. Dále platí, že jalový výkon Q_c kapacitního charakteru bude po snížení celkového proudu bude roven:

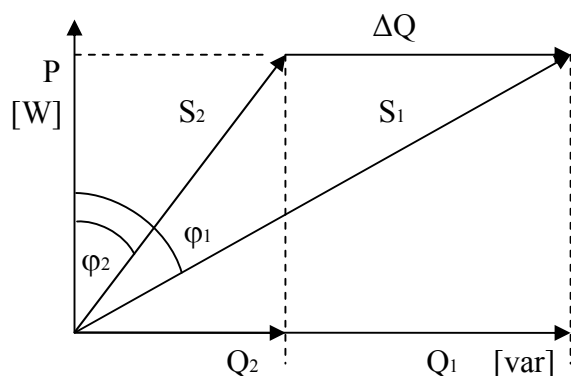
$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad [\text{var}] \quad (20)$$

Kde:

Q_c : potřebný kompenzační výkon

Q_1 : výkon před kompenzací

Q_2 : výkon po kompenzaci



obrázek 10 – Fázový diagram účinníku [2]

Pomocí goniometrické funkce tg lze vyjádřit výkon před kompenzací vztahem:

$$\text{tg } \varphi_2 = \frac{Q_2}{P}; \text{tg } \varphi_1 = \frac{Q_1}{P} \quad [-, \text{var}, W] \quad (21)$$

který se následně dosadí do celkového vzorce:

$$Q_c = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2) \quad [\text{var}, W-, -] \quad (22)$$

Vzorec $Q_c = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2) \quad [\text{var}, W-, -] \quad (22)$ je vztah pro výpočet kompenzačního výkonu, který je třeba pro snížení proudu I na hodnotu Q_2 .

2.4 Kvalita elektrické energie

Základní předpoklad pro zajištění kvality elektrické energie je dodržení jmenovitého napětí sítě, jmenovité frekvence nebo dále dodržení sinusového průběhu napětí a proudu a souměrnost trojfázové soustavy. Dodržení jmenovitého napětí a frekvence není v současné době velkým problémem, ale s rostoucím zaváděním polovodičové techniky narůstá problém s dodržáním sinusového průběhu napětí a proudu, a to zvláště z pohledu dodržení EMC⁵. Toto rušení se sleduje zejména výkonovými zařízeními a jejich vazbou na regulační nebo sdělovací systémy. EMC z hlediska rušení rozdělujeme na oblast podsynchronní, synchronní a nesynchronní, vztaheno k frekvenci rozvodné soustavy [7].

Pokud vezeme v úvahu zdroje elektrického rušení, které nám vlivem kmitočtu zkreslují sinusovku napětí, je nutné si uvědomit, že pro různý kmitočet se mění i výsledná impedance a to podle velikosti kapacitní nebo induktivní reaktance na daném kmitočtu. Z toho vyplývá, že vlivem těchto násobků harmonických, vznikají různě velké úbytky napětí, které se pak superponují na základní sinusovku napětí a tím dochází k jejímu zarušení. Laicky se dá říci, že se na této sinusovce vyskytují parazitní jevy.

Takový to periodický průběh napětí lze vyjádřit pomocí matematického modelu tzv. Fourierové transformace, která průběh převede do komplexní roviny, kde každý člen představuje fázor jednotlivé harmonické. Tím je míněno, že každou zarušenou sinusovku napětí, lze vyjádřit řadou sinusových průběhů jednotlivých harmonických [6].

Vlivem zatížení se mění i velikost protékajícího proudu distribuční soustavou a tím se mění i velikost úbytku napětí. Činná složka impedance je celkem zanedbatelná, to znamená, že velikost úbytku je závislý na jalovém proudu. Čím větší je tento proud, tím větší kolísání napětí v soustavě nastává. Jalový proud je spojen se zkratovým výkonem v místě připojení spotřebiče.

Z toho vyplývá, že nejvýznamnějším zdrojem rušení z hlediska EMC jsou spínací mechanické a elektronické prvky, které jsou zdrojem impulzivního rušení.

⁵ Elektromagnetická kompatibilita- schopnost zařízení nešířit elektromagnetické rušení do okolního prostředí

3 Možnosti eliminace vlivu na účinník odběratele

Každý odběratel, který se chce vyhnout postihům ze strany energetického zákona, musí svůj odebíraný výkon z elektrizační soustavy kompenzovat a tím pádem výslednou energii odebírat v mezích hodnot 0,95 až 1. Svým zařízením nesmí dále odběratel nikterak zpětně působit na kvalitu dodávané energie ani nijak ovlivňovat měřící techniku a systém HDO.

3.1 Principy kompenzace účinníku odběratele

Mezi základní nejrozšířenější kompenzace patří tzv. paralelní kompenzace a to pro svou ekonomičnost, kdy jalový proud je doslova přelíván do činné složky. Kompenzaci v praktickém použití lze rozdělit na:

- **individuální** – kde kompenzační zařízení (kondenzátor) je přímo připojen na svorky spotřebiče. Toto řešení má využití zejména u zářivkových svítidel nebo pro kompenzaci magnetizačního proudu asynchronních motorů [2].
- **skupinovou** – kompenzační zařízení je připojeno na přípojnice rozvaděče pro napájení skupiny spotřebičů. Toto řešení již vyžaduje vzhledem k soudobosti spotřebičů regulaci jalového výkonu [2].
- **centrální** – kompenzační zařízení je většinou připojeno na přípojnice vstupních vysokonapětových transformátorů a vzhledem k soudobosti spotřebičů je třeba menšího kompenzačního výkonu, a tudíž je nutná regulace jako v případě skupinové kompenzace [2].

3.2 Technické prostředky kompenzace

Základní rozdělení kompenzačních zařízení je na rotační a statické kompenzátory, kdy dnes rotační kompenzátory jsou na ústupu vzhledem k jejich charakteru kompenzace, kde je nutná spotřeba činné energie, vyšší nároky na údržbu a prostor.

Takový rotační kompenzátor si lze představit jako asynchronní stroj, kterému je dodávána magnetizační energie samostatným budícím vinutím. Změnou velikosti budícího proudu, pak měníme účinník odběru. Závislost mezi satorovým a budícím proudem je pak charakterizována soustavou V-křivek, které ukazují, zda-li je stroj podbuzený nebo přebuzený.

Rotační kompenzátory jsou určeny vzhledem k jejich výkonům, především pro vysoké napětí. Tudíž využívají se především k centrální kompenzaci.

Statické kompenzátory jsou závislé na dodávce činné energie a v podstatě lze říci, že se jedná o výkonové kondenzátory, nebo-li aktivní filtry pokud jsou doplněné o filtraci harmonických proudů.

Základem kompenzačního zařízení je kompenzační sekce, která je tvořena zejména sériovým RLC článkem. Můžeme říci, že je to sekce s předřazenou ochrannou tlumivkou, která zde slouží jako takový malý filtr pro vyšší harmonické a proti vzniku rezonančního kmitočtu, hlavně v oblasti HDO.

V případě, že se jedná o odběratele, který se potýká s vyšším výskytem harmonických proudů ve své síti, tak v rámci kompenzace se přiřazují jednotlivé kompenzační filtry, tvořené z jednotlivých paralelně připojených tlumivek odladěných na jednotlivé řády harmonických proudů.

3.3 Způsoby řízení kompenzačního výkonu

Měnící se průběh kapacitní zátěže vlivem práce indukčních strojů, vyvolává nutnost kompenzovat jalovou složku, a to připínáním kompenzačních sekcí nebo jednotlivých kondenzátorů. Toto připínání kapacitní zátěže bývá zejména pomocí elektromechanických stykačů (statická) nebo polovodičových prvků (dynamická).

Statická stupňovitá regulace je jednoduchá a levná, ale mezi její největší nedostatky je vznik přechodových rušivých jevů, vzniklých jako zpětný ráz na napájecí soustavu. Tyto jevy jsou částečně eliminovány předřazením ochranných tlumivek. Využívá se tam, kde není kladen tak velký důraz na rychlost kompenzace a kde se nevyskytují harmonické složky proudu.

Dynamická plynule řízená regulace může být pasivní nebo aktivní. Mezi pasivní řadíme fázově řízený IGBT tyristorový spínač v antiparalelním zapojení a využití najde zejména v oblasti, kde dochází k rychlé změně kompenzačního výkonu například ve svařovnách nebo válcovnách apod. Pasivní řízení je ale dnes již na ústupu a to vzhledem k rozmachu paralelních filtrů.

Aktivní dynamická kompenzace se vyznačuje sériovým nebo paralelním připojením filtrů nebo jejich kombinací. Tato kompenzace generuje shodné složky opačného směru, než jsou složky kompenzovaného harmonického proudu nebo napětí a pouští je do elektrické sítě. Jedná se o tzv. generátor proudu či napětí, který je tvořen můstkovým zapojením IGBT tranzistorů. Cílem aktivní kompenzace je odstranění především distorzního výkonu způsobeného vlivem vyšších harmonických proudů [6].

V současné době se již využívá regulátorů řízených mikroprocesorem s automatickou inicializací, která vhodně sestaví kompenzační sekce a vytvoří optimální spínací postup vzhledem ke kompenzovanému výkonu. Základní funkce regulátoru je, že z křivky napětí jsou odvozeny průchody nulou a v těchto okamžicích změřena hodnota proudu [6]. Pokud tedy je sinusový proud nezkreslen složkami vyšších harmonických, pak hodnota jalového proudu je rovna $I \cdot \sin\varphi$. Dražší regulátory zjišťují podíl jalového výkonu v síti průběžně z proudové větve proudového měniče [7].

3.4 Zásady pro navrhování kompenzačních stanic

Při návrhu kompenzační stanice je nutné znát průběh činného a jalového proudu v elektrické síti, zejména jeho velikost, dobu trvání a rychlost nástupu. Dále pak velikost harmonických proudů a napětí a zkratový výkon. Z tohoto se stanovují základní požadavky na kompenzační stanici. Z hlediska principu je nutné stanovit kompenzaci dle kap. 3.1, dále je nutné si stanovit způsob řízení kompenzace z hlediska charakteru vývoje jalového proudu dle kap. 3.3 a technické prostředky kompenzačních sekcí dle kap.3.2.

Výsledné kompenzační zařízení nesmí nikterak ovlivňovat kvalitu elektrické energie z hlediska nadměrného výskytu harmonických proudů nebo z hlediska energetického rušení EMC, zvláště v oblasti kmitočtu HDO.

3.5 Složení kompenzační stanice

Základem kompenzačního zařízení je kondenzátor, což je zařízení ve válcové nebo hranaté oceloplechové či hliníkové nádobě, ve které jsou vhodně umístěné svitky a pokovené elektrody s polypropylenovou fólií. Tyto kondenzátory se většinou dávají do série s tlumivkou, z důvodu omezení rázu zapínacího proudu nebo filtrace harmonických složek, který by mohli ovlivňovat distribuční soustavu.

Tlumivky využívané v kompenzačních zařízeních můžeme rozdělit na ochranné, filtrační a dekompenzační. V případě chráněné kompenzace dle kap. 3.2 se logicky používají ochranné tlumivky, které zařízení chrání před proudovými rázy a rezonančními jevy, ale také mohou zvyšovat elektromagnetickou kompatibilitu kondenzátorové sekce. Tlumivka se většinou ve výrobě ladí na filtraci 3. až 5. harmonické, z důvodu výskytu signálu HDO v těchto oblastech. Filtrační tlumivky pro odsávání harmonických proudů se v základní kompenzaci nepoužívají a to zejména vzhledem k jejich ceně. Dekompenzační tlumivky se využívají zejména tam, kde je přebytek kapacitního výkonu, což je může stát jen v případě dlouhých napájecích kabelových tras. Zejména mají využití u Českých drah, kde jsou dlouhé napájecí kabely zabezpečovacích obvodů na trati. V tomto případě se do sítě nedodává kapacita, ale indukčnost.

Pro připojení kondenzátorů a tlumivek do obvodu se využívá buď elektromechanických stykačů, nebo tyristorových spínačů a volba je podle charakteru nástupu jalového proudu. V mnohých případech postačuje připínání kompenzačních sekcí (kondenzátor s tlumivkou) mechanickým způsobem, ale existují provozy s dynamicky proměnlivou změnou jalového výkonu, kde se doporučuje využívat ke spínání těchto sekcí, tyristorových spínačů. Jedná se zejména o provozy svařoven a obloukových pecí, což jsou mimochodem provozy náročné nejenom na kompenzaci jalového výkonu, ale i na filtraci celého spektra harmonických proudů. Pro elektromagnetické spínání se využívají stykače s odporovým spínáním, z důvodu opalování kontaktů a vzniku impulzivního rušení. Pokud ke spínání kompenzačních sekcí využíváme dynamického spínání, mluvíme o spínání polovodičovými prvky, zejména o tyristorovém spínači. Tento spínač je v praxi zapojen do antiparalelního zapojení tyristorů a to z důvodu podmínky sepnutí tyristoru vždy, když napětí prochází nulou (synchronně k síti) [7].

Řízení kompenzačních sekcí zajišťuje regulátor jalového výkonu popsany v kap. 3.3, kde lze snad už jenom doplnit, že regulátor automaticky rozeznává připojení jednotlivých stupňů (sekcí), které postupně na základě vhodného algoritmu připíná do kompenzačního obvodu. Tyto stupně jsou z regulátoru ovládány přes spínací prvek (stykač, tyristorový spínač). Cílem regulátoru je zajistit účinník $\cos \varphi$ v rozmezí 0,95 – 1, což jsou dovolené hodnoty, které je možné pouštět do distribuční sítě. Tyto hodnoty jsou stanovené v energetickém zákoně.

3.6 Možnosti kompenzace jalového výkonu

Pokud shrneme, jaké má odběratel možnosti, aby správně navrhl kompenzační zařízení, je nutné zejména vycházet ze stanovení určené [6]:

- Místem a způsobu připojení kompenzační stanice.
- Způsobem rychlosti regulace kompenzačního výkonu.
- Způsobem snížení vlivu energetického rušení na kompenzační stanici.
- Způsobem snížení vlivu HDO na kompenzační stanici a naopak.

Ekonomický dopad za nedodržení účinníku se přenesse na odběratele formou přírůžek za nesplnění předepsaného účinníku. Platby jsou stanoveny v ceníku elektrické energie. Způsob výpočtu je dán vztahem:

$$\cos \varphi = \cos [\arctg A_j / (A_\xi + A_V)] \quad [-, -, \text{kvarh, kWh, kWh}] \quad (23)$$

Kde:

A_j : Spotřebovaná jalová energie v denní době

A_ξ : Spotřebovaná činná energie ve špičkovém tarifu

A_V : Spotřebovaná energie ve vysokém tarifu

3.7 Příklad kompenzační stanice v praxi



obrázek 11 – Kompenzační sekce



obrázek 12 – Regulátor jalového výkonu RM9612

Jako příklad z praxe je uvedena kompenzační stanice Národního divadla v Praze, tato stanice se skládá z několika hrazených kompenzačních sekcí, které jsou složeny z kondenzátorových baterií, ochranných (hradících) tlumivek, stykačů s odporovým spínáním a jednoho regulátoru jalového výkonu. Na *obrázku 12* je vidět regulátor jalového výkonu, který momentálně v době focení pracoval s účinníkem 0,96 a připojil tři kompenzační sekce. Při pohledu z druhé strany jsou vidět kompenzační sekce, kde dole jsou kondenzátory, zhruba uprostřed jsou ochranné tlumivky a nahoře stykače pro připojování jednotlivých sekcí do kompenzačního obvodu *obrázek 11*. Jalová energie přenášená do distribuční sítě je vyhodnocována elektroměrem, který z pozice zákazníka velkoodběratele je instalovaný energetickými závody a je v jejich majetku.

4 Praktická ukázka základní eliminace pasivních výkonů

Pro demonstraci základní kompenzace jalového výkonu a pro simulaci distorzního výkonu je v práci uvedeno laboratorní měření s názorným výkladem pro konkrétní představu.

4.1 Laboratorní pokus kompenzace jalového výkonu

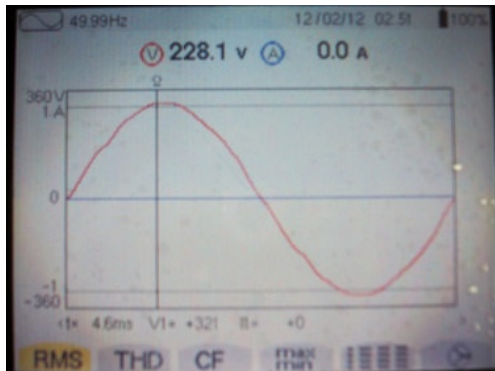
Pro měření byl použit laboratorní zdroj C.A 8332B *obrázek 13*. Vzhledem k tomu, že přístroj je určen pro větší rozsahy měření bylo nutné při měření proudu upravit stupnici měření.



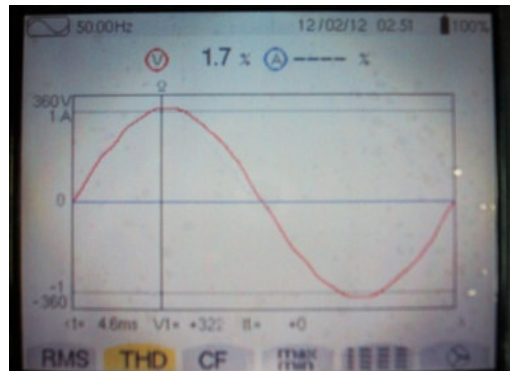
V praxi se ukázalo, že při měření proudů velikosti řádově desítek mA docházelo k problémům. Měřící přístroj tyto proudy odmítal měřit... Proto byla v konfiguraci přístroje nastavena převodní konstanta pro měření proudu 10x vyšší ... to znamená, že skutečné proudové hodnoty jsou 10x nižší. Toto zkreslení samozřejmě ovlivnilo i všechny následující výpočty. Nešlo však přesné absolutní hodnoty, ale o vysvětlení a znázornění problematiky kompenzace jalového výkonu.

obrázek 14 – Laboratorní zdroj

Jako napájecí zdroj bylo využito napětí elektrorozvodné sítě. Kde nutno podotknout, že vzhledem k současnému zatěžování sítě spínanými zdroji, měniči, usměrňovači apd., dochází ke značnému zkreslení tvaru „sinusovky“. Toto zkreslení mělo značný vliv na celé měření *obrázek 15*, proto nejdříve provedeme analýzu síťového průběhu *obrázek 14*.



obrázek 16 – Napětí sítě 228 VAC

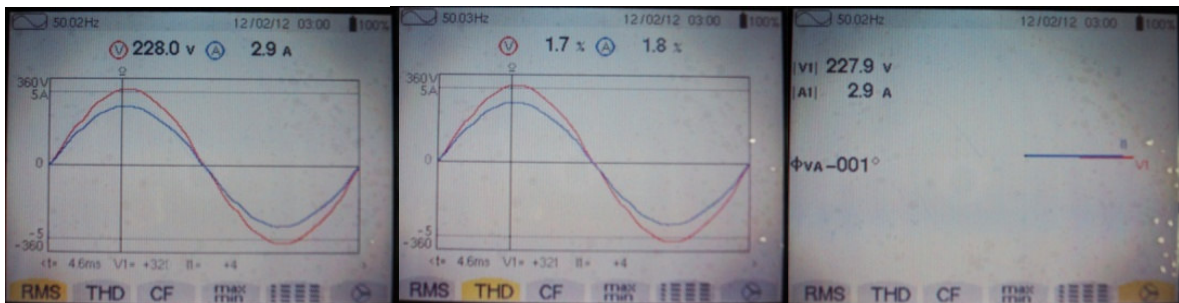


obrázek 15 – Harmonické zkreslení sítě

Jak je vidět z průběhu měření, tak harmonické zkreslení se pohybuje v hodnotách cca 1,7%. Zdálnivě je tato hodnota zanedbatelná. Ve skutečnosti však značně ovlivňuje průběhy v obvodu.

4.1.1 Činná zátěž

Po připojení činné zátěže proud kopíruje napětí. A to jak průběhem, tak časovým posunem. Průběh proudu by měl mít stejný tvar, jako průběh napětí, vzájemné posunutí by nemělo být žádné.

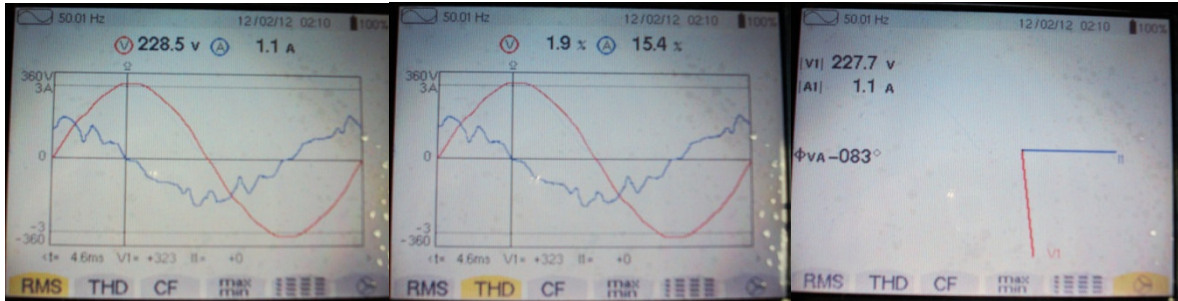


obrázek 17 – Křivky napětí a proudu a jejich vzájemný posun v činné zátěži

Napětí a proud jsou ve fázi, mají stejný tvar, stejné zkreslení, vzájemné posunutí není žádné *obrázek 16*.

4.1.2 Připojený kondenzátor

Jak značný vliv má toto zkreslení na elektrické poměry v síti je vidět, z průběhu proudu u připojeného kondenzátoru.



obrázek 18 – Křivky napětí a proudu a jejich vzájemný posun při kapacitní zátěži

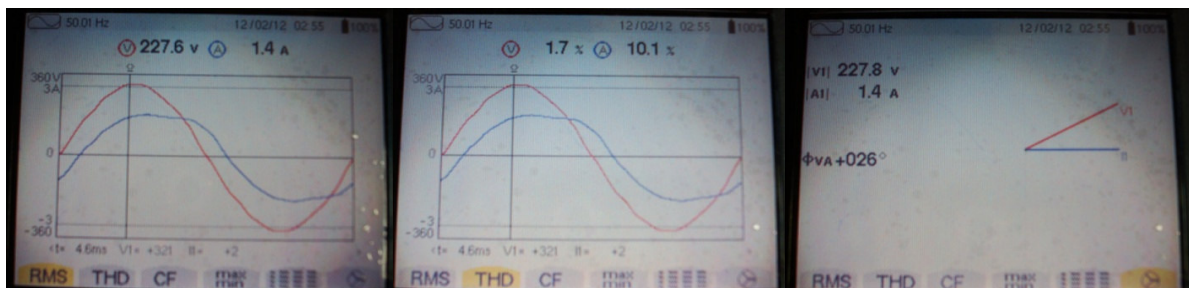
Z obrázků je vidět, jak silné zkreslení proudu způsobuje deformace sinusového průběhu sítě. Je také dobře patrné předbíhání proudu kondenzátoru před napětím kondenzátoru.

Tvar proudu (kondenzátorem) byl ověřován i osciloskopem, kde bylo měřeno napětí na bočniku, kterým procházel tento proud. Měření potvrdilo korektnost a pravdivost tohoto průběhu *obrázek 17*.

Tento stav, kdy se k měření používá ne zcela harmonické napětí má vliv na naměřené údaje. Toto je také vysvětlení, proč údaje a průběhy nejsou zcela ideální a učebnicové.

4.1.3 Připojený transformátor

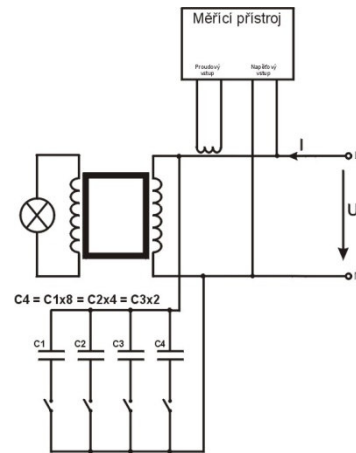
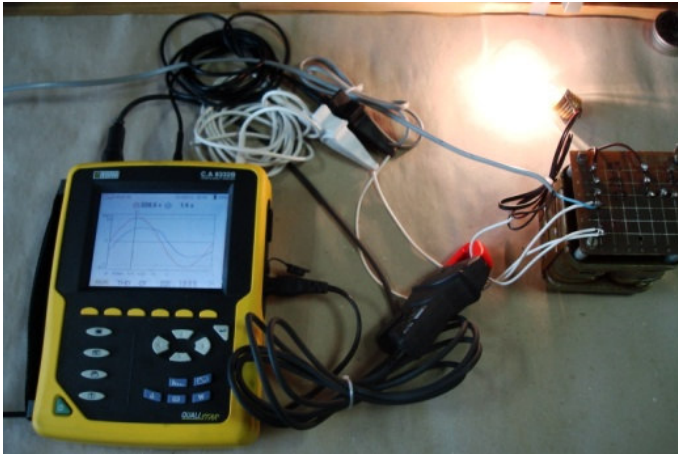
Pokud se do obvodu připojil transformátor, výsledné fázové posuny byly patrné, že napětí předbíhalo proud *obrázek 18*.



obrázek 19 – Křivky napětí a proudu a jejich vzájemný posun při indukční zátěži

4.1.4 Vlastní pokus:

V předchozích kapitolách bylo demonstrováno připojení různých zátěží do elektrické sítě. Nyní tyto zátěže připojíme do jednoho obvodu s cílem ukázat vlastní kompenzaci na jednoduchém příkladu.



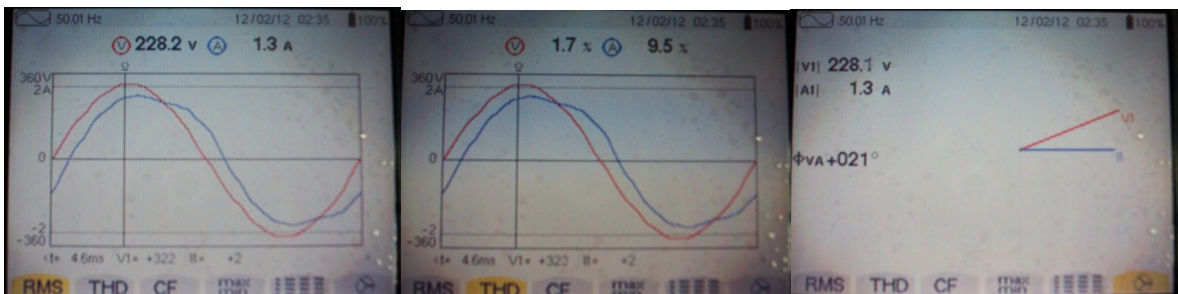
obrázek 20 – Praktická ukázka kompenzace JV a schéma zapojení obvodu

Vlastní laboratorní pokus spočíval v tom, že do činné a induktivní zátěže vyvolané žárovkou a transformátorem, byly postupně připínány kondenzátory s jednotlivou kapacitou (0,1; 0,2; 0,4; 0,8 μF) obrázek 19. Jednoduchý regulátor jalového výkonu je znázorněn na obrázku 20 a spočívá v připojování kapacity do obvodu až do „vykompenzovaného stavu“⁶.



obrázek 21 – Mechanický regulátor JV

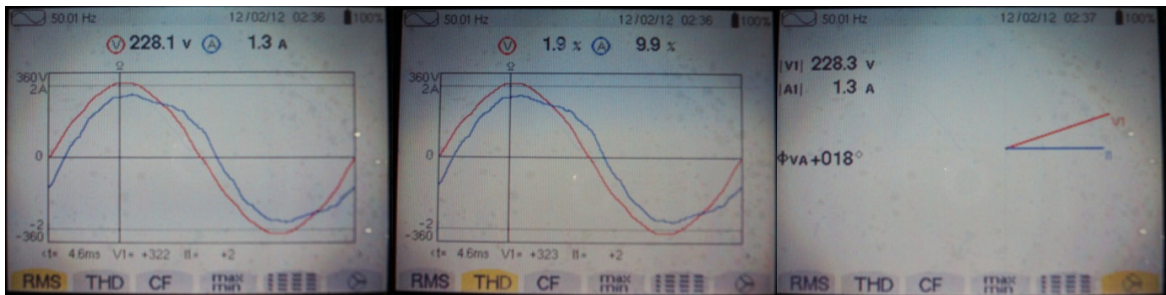
Jednotlivé průběhy napětí a proudu po připojování jednotlivých kapacit, jsou vidět na následujících obrázcích obrázek 21 – obrázek 26.



obrázek 22 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 100 μF

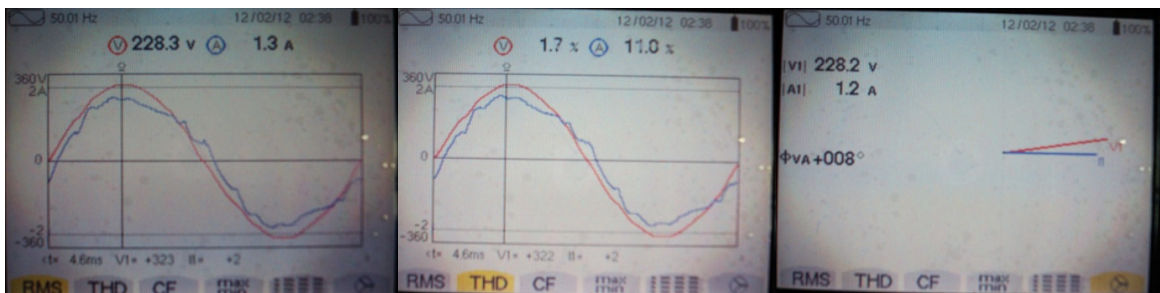
⁶ Stav, kdy $\cos\varphi$ je přibližně rovno jedné

Průběhy na obrázku výše, znázorňují stav v obvodu po připojení kondenzátoru 100nF. Velikost odebíraného proudu se zmenšila a zmenšil se nepatrně i úhel $\cos\varphi$ na 21° .



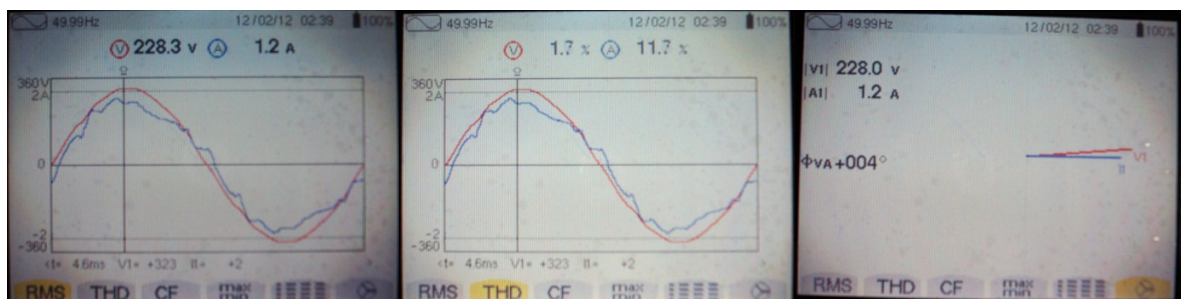
obrázek 23 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 300 ηF

Po připojení kapacity 300nF je vidět menší úhel $\cos\varphi$ 18° . Proud zůstal nezměněn ..., což je možné zapříčiněno přesností měřícího přístroje a také tím, že při tomto měření je vyšší harmonické zkreslení průběhu proudu, které s přidáváním kapacity bude ještě vyšší, jak je možné vidět na následujících obrázcích.



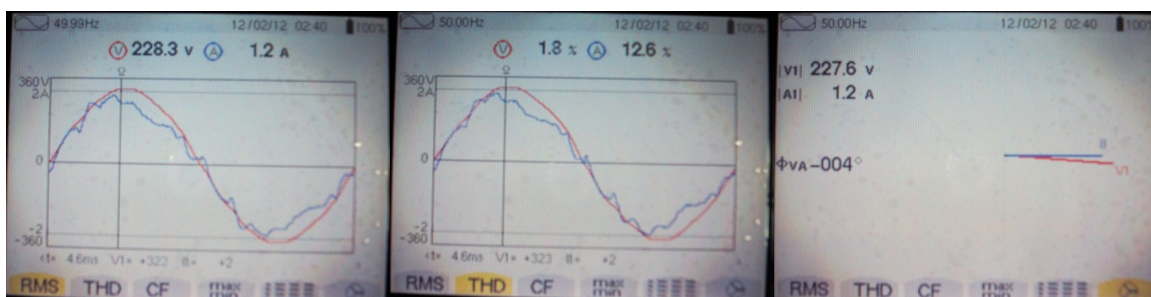
obrázek 24 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 500 ηF

S připojeným kapacity 500nF se úhel $\cos\varphi$ opět zmenšil na 8° . Velikost efektivní hodnoty napětí a proudu zůstává nezměněna následkem harmonického zkreslení proudu efektivní hodnoty.



obrázek 25 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 700 ηF

Připojená kapacita 700nF má za následek opět zmenšení úhlu $\cos\varphi$ na 4° . Velikost efektivní hodnoty proudu je o desetinu menší. Zde se dá hovořit o již dobře vykompenzovaném spotřebiči.



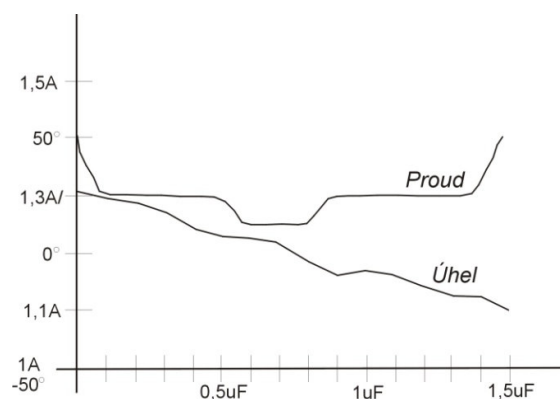
obrázek 26 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 800 η F

Pokud byla připojena kapacita 800nF, tak úhel $\cos\varphi$ se přehoupl do IV. kvadrantu a je možno hovořit o překompenzovaném spotřebiči.



obrázek 27 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 1500 η F

Průběhy na obrázek 27 znázorňují stav obvodu s připojeným kondenzátorem 1500nF. Zde je možno hovořit o silně překompenzovaném spotřebiči. Spotřebič spolu s kondenzátorem se jeví jako spotřebič kapacitního charakteru.

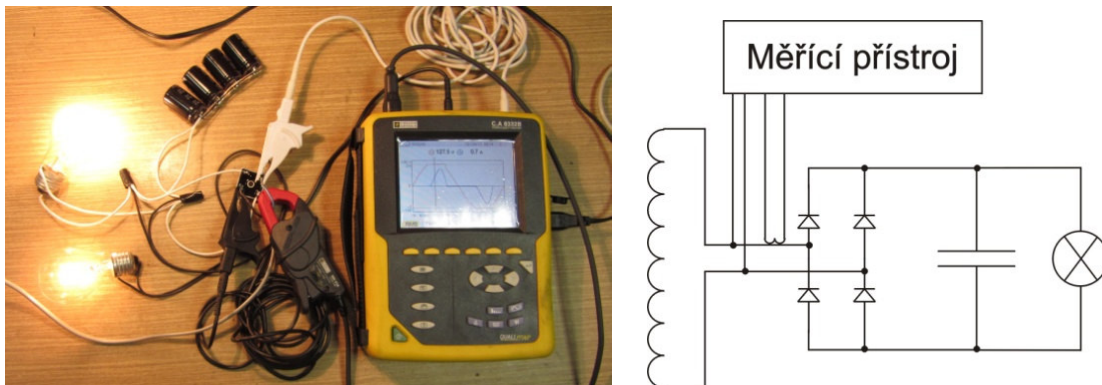


obrázek 28 – Graf průběhu kompenzace

Jak je zřejmé z přiloženého grafu na obrázku 27, došlo kompenzací ke zmenšení vstupního proudu a ke snížení úhlu. Bohužel výsledky nejsou příliš transparentní. Svou roli zde hrálo několik faktů. Měřicí přístroj pracoval na spodní hranici svého rozsahu, napájecí napětí bylo zatíženo poměrně značným zkreslením, velikost používaných kapacit nebyla příliš vysoká vzhledem k rozsahu přístroje.

4.2 Laboratorní pokus simulace distorzního výkonu

Tuto situaci byla namodelována v laboratorních podmínkách na jednoduchém obvodu zatíženého usměrňovače s filtrační kapacitou, kde byl měřen vliv neharmonického průběhu na zatížení sítě *obrázek 28*.



obrázek 29 – Praktická ukázka simulace distorzního výkonu a schéma zapojení

Neharmonický průběh proudu má vliv na tepelné zatížení vodiče. Zkusme si vysvětlit, jakým způsobem toto zkreslení ovlivňuje zatížení sítě a ztráty při přenosu.

Z fyziky je známé, že proud, který prochází vodičem, přenáší nějaký náboj. Z hlediska střední hodnoty přeneseného náboje je lhostejné, zda proud bude přenášen nějakou dobu nějakou velikostí proudu, nebo poloviční dobu dvojnásobnou velikostí proudu. Přenesený náboj je v obou případech stejný. Pokud bychom tímto proudem nabíjeli akumulátor, tak mu v obou případech dodáme stejný náboj, zanedbáme-li vyšší ztráty na vnitřním odporu akumulátoru, tak ho v obou případech nabijeme stejně.

Kdybychom tyto dva proudy porovnávali přístroji, které měří střední hodnotu proudu, tj. třeba ručkovým přístrojem s deprézskou soustavou nebo případně méně kvalitním přístrojem digitálním, který měří principiálně pouze střední hodnotu, tak by u obou proudů, přístroj zaznamenal stejnou velikost proudu.

V případě použití jakostnějšího přístroje, který opravdu měří skutečnou efektivní hodnotu (tzv. RMS), by u každého z průběhů byla naměřena jiná velikost! Proud, který prochází poloviční dobu, avšak s dvojnásobnou velikostí, by vykazoval vyšší RMS hodnotu a více by ohříval vodič. Při přenosu by byly vyšší ztráty.

Nejefektivnější přenos energie je stejnosměrným proudem. Ten má však mnohé jiné nevýhody, a tak se nepoužívá.

V případě, že bychom se chtěli přesvědčit o korektnosti RMS hodnoty k tepelným ztrátám ve vodiči, stačí tento proud, respektive oba tyto proudy, vést přes dvě stejné žárovky. Žárovka v obvodu s vyšší RMS hodnotou proudu svítí více, než žárovka s nižší RMS hodnotou *obrázek 29*. Žárovka demonstruje tepelné ztráty v obvodu.

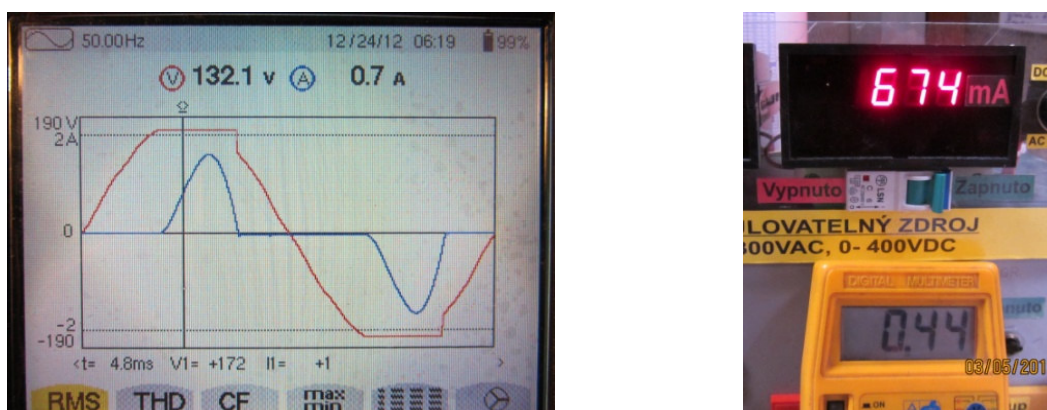


obrázek 30 – Porovnání ztrátových výkonů při kontinuálním a obdélníkovým průběhu proudu stejné hodnoty

Tento jev platí i v případě, že by např. ručkové přístroje ukazovaly stejnou hodnotu proudu i s přihlédnutím na to, že bychom těmito dvěma proudy nabili akumulátor stejným nábojem.

Důvodem tohoto jevu je fakt, že výkon je na proudu závislý kvadraticky a z toho vychází výpočet tepelné, RMS hodnoty proudu.

Toto tvrzení bylo ověřeno pokusem, kde jsme měřili celkem se dvěma přístroji a u jednoho z nich byla nápadná odchylka v naměřené hodnotě *obrázek 30*.



obrázek 31 – Průběhy vstupního U a I čtyřcestného usměrňovače a porovnání střední efektivní a RMS hodnoty

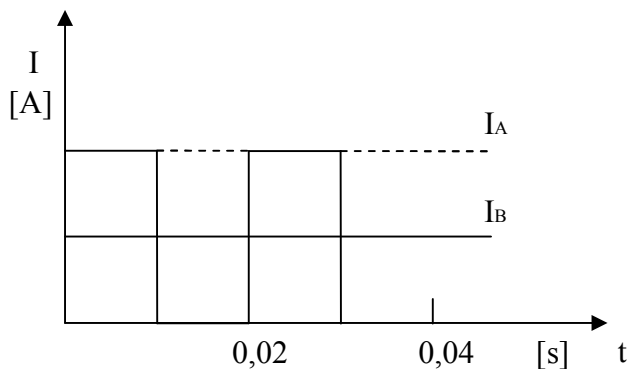
Levnější přístroje měří pouze střední hodnotu proudu a vzhledem k vhodné kalibraci je vlastně násobí konstantou 1,11. Což je převrácený poměr mezi střední hodnotou absolutní hodnoty měřeného proudu a efektivní hodnoty daného proudu. Vše je kalibrováno a uvažováno pro harmonický průběh!

Uvažovaný průběh má efektivní hodnotu cca 0,68A. Měřicí přístroj, který měří pouze střední hodnotu (viz výše vysvětlené) nám ukazuje 0,44A. Střední hodnota absolutní hodnoty přenášeného proudu je tedy 0,4A, tudíž poměr mezi efektivní hodnotou a střední hodnotou absolutní hodnoty uvažovaného proudu je 1,7.

Pokud máme hodnotit efektivitu přenosu el. energie mezi poměrem efektivní hodnoty uvažovaného proudu a střední hodnoty absolutní hodnoty uvažovaného proudu je možno konstatovat následující:

U stejnosměrného proudu je tento poměr roven 1. To znamená, že zde je tato efektivita nejlepší. U harmonického průběhu je poměr roven 1,11. A u neharmonického průběhu je poměr roven 1,7.

Zde je vidět jaký negativní účinek má deformace sinusovky na tepelné zatížení vodičů a následné ztráty vedením.



obrázek 32 – Porovnání stejnosměrných proudů různých charakterů

I_A – DC proud obdelníkového charakteru I_B – DC proud kontinuální

Na obrázku 31 je vidět velmi obecná demonstrace distorzního výkonu na stejnosměrném proudu. Obecně tu platí, že čím je proud dodáván ve větších pulzech, tím je distorzní výkon vyšší. Toto tvrzení je demonstrováno ve vzorcích (24) a (25).

$$P_A = \frac{P_{Amax}}{2} = \frac{U \cdot I}{2} = \frac{R \cdot I^2}{2} ; P_A = \frac{P_{Amax}}{2} = \frac{U \cdot I}{2} = \frac{R \cdot I^2}{2} \quad [W, V, A, \Omega] \quad (24)$$

$$P_B = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad [W, V, A, \Omega] \quad (25)$$

Oba vzorce ukazují, že obvod zatížený stejným odporem má v případě průtoku stejného proudu s různou frekvencí, různé výkonové zatížení. Pokud budeme uvažovat hodnotu odporu 2Ω pro oba obvody a napětí $2V$, bude $P_A = 8 W$ a $P_B = 16 W$! To znamená, že čím vyšší jsou proudové špičky, tím vyšší je tepelné zatížení obvodu.

5 Zhodnocení a závěr

Na základě analýzy pasivních výkonů a charakteru spotřeby elektrické energie odběratelem, je možné pouze doporučit určitý typ kompenzace. Účinník odběratele lze v tomto případě eliminovat pouze vhodně navrženou kompenzační stanicí. Návrh kompenzační stanice vychází z problematiky uvedené v kap. 3.4. a vyžaduje detailní a konkrétní požadavky z hlediska odběratele a je to námět na další téma bakalářské práce.

Problematika pasivních výkonů je velmi obsáhlé a složité téma, které není možné celkově obsáhnout v jedné práci, a proto tato práce je pouze úvodem do této problematiky s cílem základního pochopení, jak se tyto výkony chovají v distribuční soustavě a jaká je možnost snížení jejich vlivu na elektrizační soustavu.

Ekonomické zhodnocení problematiky eliminace pasivních výkonů vychází z obecného zadání práce a lze konstatovat, že jedním z nejdůležitějších kritérií pro snížení finančních nákladů ze strany odběratele je vhodně navrhnout jednak kompenzaci jalového výkonu a jednak filtraci vyšších harmonických složek. Tento přínos ve vhodném návrhu ušetří odběrateli finanční prostředky ze strany zvýšení efektivity činného výkonu a snížení přírážek za nedodržený účinník ze strany energetických závodů.

V současné době technika pro eliminaci pasivních výkonů na velmi slušné úrovni a je to pro mnohé odběratele pouhou otázkou finančních prostředků, bohužel v době nízkého ekonomického růstu se nemodernizují provozy s kompenzačními zařízeními. Tato skutečnost má za následek, že vlivem trendu masivního zavádění polovodičové techniky v oblasti spínaných zdrojů se stává, že stávající kompenzační stanice odběratele již nevyhovuje, protože nedokáže filtraci harmonických složek napětí a proudu ze sítě odstranit.

Pokud bychom se podívali do budoucnosti, co převratného se bude dít v oblasti kompenzace, tak dojdeme k názoru, že vývoj pokračuje pouze ve zdokonalování kompenzačních stanic z hlediska účinnosti a filtrace harmonických proudů. Žádný převratný zlom z hlediska změny principu kompenzace se neočekává, snad jen nutné si uvědomit, že v budoucnu vlivem polovodičových součástek budou nastupovat spotřebiče, které budou pracovat s účinníkem blízkým jedné, ale na úkor zvýšeného přísunu deformačního výkonu do elektrizační soustavy. Kompenzace deformačního nebo-li distorzního výkonu, stejně tak pulzačního nebo skrytého, bude možná budoucnu pouze o použití vhod-

ného aktivního filtru. Vzhledem k velikosti aktivních filtrů, jsou již nyní tyto filtry integrovány například do napěťového měniče pohonu a ten tím pádem odebírá ve spojení s asynchronním motorem sinusový proud ve fázi s napětím, tudíž lze říci, že odpadá klasická kompenzace. Z hlediska ekonomického je tento typ kompenzace ještě u velkých strojů značně nákladný.

Dalším trendem v oblasti snížení zpětných vlivů vyšších harmonických na distribuční soustavu je zavedení tzv. usměrňovačů s pulzně šířkovou modulací. Jestli tento trend bude masově nasazen, je spíše otázkou blízké budoucnosti.

Závěrem však lze říci, že klasická kompenzace pomocí kondenzátorů a tlumivek bude i nadále v budoucnu nejvíce využívanou kompenzací s tím, že aktivní filtry nahradí zastaralé filtry pasivní s dekompenzačními tlumivkami.

6 Citovaná literatura

- [1] wikipedie, „http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_v%C3%BDkon“, 2012. [Online].
- [2] Molnár, „<http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf>“, 2007. [Online].
- [3] Tyrbach, „http://web.telecom.cz/tyrbach/Stridavy_vykon.pdf“, 2011. [Online].
- [4] wikipedie, „<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reaktance>“, 2012. [Online].
- [5] Navaris, „http://www.ceskaenergetika.cz/chranena_kompenzace/harmonicke_frekvence_a_kompenzace.html“, www.navaris.cz, 2009. [Online].
- [6] Korec, *Kompenzace jalového výkonu v praxi*, Praha: IN-EL, 1999.
- [7] Molnár, „ELEKTRO“, *Řešení potíží v elektrických rozvodech*, sv. 4, č. 2006, pp. 2-3, 2006.
- [8] Neznámý, *Obvody střídavého proudu*, 2008.

7 Seznam obrázků

obrázek 1 – Fázový diagram [3]	5
obrázek 2 – Výkon harmonického proudu v obvodu s induktivním charakterem [8]	7
obrázek 3 – Fázový diagram [3]	7
obrázek 4 – Výkonový trojúhelník	8
obrázek 5 – Kapacitní spotřebič	14
obrázek 6 – Průchod U, I cívkou a rezistorem v serii a vyjádření průběhu ve fázovém diagramu	15
obrázek 7 – Průchod U, I cívkou a rezistorem v paralelním zapojení a vyjádření průběhu ve fázovém diagramu	16
obrázek 8 – Schéma jednoduchého kompenzátoru a vyjádření průběhu veličin ve fázovém diagramu	17
obrázek 9 – Schéma jednoduchého kompenzátoru a vyjádření vykompenzovaného průběhu veličin ve fázovém diagramu	17
obrázek 10 – Fázový diagram účinníku [2]	18
obrázek 11 – Regulátor jalového výkonu RM9612	24
obrázek 12 – Kompenzační sekce	24
obrázek 13 – Kompenzační sekce	24
obrázek 14 – Laboratorní zdroj	25
obrázek 15 – Harmonické zkreslení sítě	26
obrázek 16 – Napětí sítě 228 VAC	26
obrázek 17 – Křivky napětí a proudu a jejich vzájemný posun v činné zátěži	26
obrázek 18 – Křivky napětí a proudu a jejich vzájemný posun při kapacitní zátěži	27
obrázek 19 – Křivky napětí a proudu a jejich vzájemný posun při induktivní zátěži	27
obrázek 20 – Praktická ukázka kompenzace JV a schéma zapojení obvodu	28
obrázek 21 – Mechanický regulátor JV	28
obrázek 22 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 100 μF	28
obrázek 23 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 300 μF	29
obrázek 24 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 500 μF	29
obrázek 25 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 700 μF	29
obrázek 26 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 800 μF	30
obrázek 27 – Průběh napětí a proudu po připojení kapacity 1500 μF	30
obrázek 28 – Graf průběhu kompenzace	30
obrázek 29 – Praktická ukázka simulace distorzního výkonu a schéma zapojení	31
obrázek 30 – Porovnání ztrátových výkonů při kontinuálním a obdélníkovým průběhu proudu stejné hodnoty	32
obrázek 31 – Průběhy vstupního U a I čtyřcestného usměrňovače a porovnání střední efektivní a RMS hodnoty	32
obrázek 32 – Porovnání stejnosměrných proudů různých charakterů	33