

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

SW NADSTAVBA ANALYZÁTORU SÍTÍ  
PRO AUTOMATICKÝ NÁVRH NN KOMPENZAČNÍ JEDNOTKY NA  
ZÁKLADĚ MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. FRANTIŠEK BERNÁTH

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

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

# **SW NADSTAVBA ANALYZÁTORU SÍTÍ PRO AUTOMATICKÝ NÁVRH NN KOMPENZACNÍ JEDNOTKY NA ZÁKLADĚ MĚRENÍ**

**A POWER NETWORK ANALYZER SW UPGRADE IMPLEMENTING LV PFC CAPACITORS BANK  
DESIGN ON THE BASIS OF MEASUREMENT**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. FRANTIŠEK BERNÁTH**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.**

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektroenergetika**

**Student:** Bc. František Bernáth

**ID:** 78509

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**SW nadstavba analyzátoru sítí  
pro automatický návrh nn kompenzační jednotky na základě měření**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie výkonu a paralelní kompenzace
2. Data poskytovaná vybraným analyzátozem sítí a možnost jejich využití
3. Postup návrhu statické kompenzační jednotky
4. Algoritmizace návrhu kompenzační jednotky
5. Ověření navrženého algoritmizovaného postupu v reálné instalaci

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 24.5.2010

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

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

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

BERNÁTH, F. SW nadstavba analyzátoru sítí pro automatický návrh nn kompenzační jednotky na základě měření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 86s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracoval samostatne a použil som len podklady uvedené v priloženom zozname.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKE V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Diplomová práce**

**SW nadstavba analyzátoru sítí  
pro automatický návrh nn kompenzační jednotky na  
základě měření**

**Bc. František Bernáth**

**vedoucí: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

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

**Master's Thesis**

**A power network analyzer SW upgrade  
implementing LV PFC capacitors bank design on the  
basis of measurement**

by

**Bc. František Bernáth**

**Supervisor: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2010**

## **ABSTRAKT**

Práca sa zaoberá problematikou kompenzácie účinníku na hladine nízkeho napätia. Napriek dlhému technologickému vývoju má táto oblasť svoje úskalia. Cieľom diplomovej práce je predstrieť čitateľovi variantu automatizovaného návrhu kompenzačnej jednotky. Postup sa zakladá na využití nameraných údajov z analyzátoru siete MEg30.

Do návrhového algoritmu je potrebné zapracovať maximálne množstvo ovplyvňujúcich faktorov. Preto je jadro práce venované rozboru témy regulácie jalového výkonu.

**KLÚČOVÉ SLOVÁ:** Kompenzácia účinníku; jalový výkon; harmonické skreslenie; Fourierova rada; Stupňovitá kompenzácia; Aktívny filter; Vážené celkové harmonické skreslenie.

## **ABSTRACT**

This thesis is devoted to a problem of Power Factor Correction on the low voltage level. It has still its own difficulties despite the fact that this topic moved through long development. The main goal of this work is to offer reader variable procedure considering design process. It is based on use of measured data of network analyzer Meg30.

The design algorithm has to share a maximum of eventual influencing factors. Therefore the body of master thesis goes through detailed analysis of Power Factor Correction.

**KEY WORDS:** Power factor correction; Reactive Power; Harmonic Distortion; Fourier's Series; Stepped Compensation; Active filter; Weighed Total Harmonic Distortion.



## OBSAH

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>12</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>14</b>
<b>2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY.....</b>	<b>15</b>
<b>3 CIELE PRÁCE.....</b>	<b>16</b>
<b>4 METÓDY A POSTUPY RIEŠENIA .....</b>	<b>17</b>
<b>5 PARALELNÁ KOMPENZÁCIA V LINEÁRNOM ELEKTROMAGNETICKOM PROSTREDÍ.....</b>	<b>18</b>
<b>5.1 VÝKONY V LINEÁRNOM PROSTREDÍ .....</b>	<b>18</b>
<b>5.2 DÔSLEDKY PREVÁDZKOVANIA SPOTREBIČOV S <math>\cos \phi &lt; 1</math>.....</b>	<b>22</b>
<b>5.3 RIEŠENIE NEVHODNÉHO <math>\cos \phi</math> – KOMPENZÁCIA ÚČINNÍKA .....</b>	<b>24</b>
<b>6 NELINEÁRNE ELEKTROMAGNETICKÉ PROSTREDIE.....</b>	<b>26</b>
<b>6.1 ÚVOD KU KVALITE ELEKTRICKEJ ENERGIE .....</b>	<b>26</b>
<b>6.2 HARMONICKÉ SKRESLENIE V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE.....</b>	<b>27</b>
6.2.1 KVANTITATÍVNE VYJADRENIE HARMONICKÉHO SKRESLENIA .....	28
6.2.2 ZDROJE HARMONICKÉHO SKRESLENIA .....	31
6.2.3 DÔSLEDKY ŠÍRENIA HARMONICKÝCH PRÚDOV .....	34
6.2.4 DÔSLEDOK DEFORMÁCIE NAPÄTIA .....	36
<b>6.3 KOMPENZAČNÉ JEDNOTKY V HARMONICKY SKRESLENOM PROSTREDÍ.....</b>	<b>38</b>
6.3.1 ZVÝŠENÉ DIELEKTRICKÉ NAMÁHANIE .....	38
6.3.2 PRÚDOVÉ ZÁKMITY VPLYVOM DEFORMÁCIE NAPÄTIA .....	39
6.3.3 REZONANCIA KONDENZÁTOROV SO SIEŤOVÝMI PRVKAMI.....	40
<b>6.4 VÝKONY V NELINEÁRNOM ELEKTROMAGNETICKOM PROSTREDÍ.....</b>	<b>44</b>
6.4.1 BUDEANUOVA TEÓRIA VÝKONU .....	44
6.4.2 TEÓRIA OKAMŽITÝCH VÝKONOV P-Q .....	46
<b>7 TECHNICKÁ REALIZÁCIA KOMPENZÁCIE ÚČINNÍKU.....</b>	<b>52</b>
<b>7.1 PREVEDENIE KOMPENZÁCIE Z HLADISKA JEJ UMIESTNENIA .....</b>	<b>52</b>
<b>7.2 PREVEDENIE KOMPENZÁCIE Z HLADISKA RIADENIA JALOVÉHO VÝKONU .....</b>	<b>55</b>
7.2.1 STUPŇOVITO RIADENÉ KOMPENZÁTORY .....	56
7.2.2 PLYNULO RIADENÉ KOMPENZÁCIE – PASÍVNE .....	57
7.2.3 PLYNULO RIADENÉ KOMPENZÁCIE - AKTÍVNE .....	58
<b>7.3 PRISPÔSOBENIE KOMPENZÁCIE ENERGETICKÉMU RUŠENIU .....</b>	<b>59</b>
7.3.1 KONDENZÁTORY .....	59
7.3.2 CHRÁNENÉ KOMPENZAČNÉ JEDNOTKY.....	61
7.3.3 PASÍVNE FILTRE.....	66
<b>7.4 OSTATNÉ HLADISKÁ PRI NÁVRHU KOMPENZAČNEJ JEDNOTKY.....</b>	<b>68</b>
<b>8 ÚDAJE POSKYTOVANÉ ANALYZÁTOROM SIETE MEG30.....</b>	<b>69</b>
<b>9 ALGORITMUS .....</b>	<b>73</b>
<b>10 TESTOVANIE.....</b>	<b>81</b>
<b>11 ZÁVER.....</b>	<b>84</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>85</b>

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 5-1: Výkonový trojuholník.....	20
Obr. 5-2: Činný výkon $P$ odporovej záťaže [11] .....	21
Obr. 5-3: Oscilujúce jalové výkony $Q$ indukčnosti[11] .....	21
Obr. 5-4: Náhradná schéma prenosového vedenia .....	22
Obr. 5-5: Fázorový diagram pre nekompensované vedenie.....	23
Obr. 5-6: Paralelná kompenzácia – náhradná schéma .....	24
Obr. 5-7: Efekt paralelnej kompenzácie, fázorový diagram.....	25
Obr. 5-8: Efekt paralelnej kompenzácie – výkonový trojuholník.....	25
Obr. 6-1: Rozklad harmonicky skresleného signálu na harmonické komponenty [19].....	28
Obr. 6-2: Harmonické amplitúdové a fázové spektrum .....	29
Obr. 6-3: Rozklad nesymetrickej sústavy na súradné sústavy [23].....	30
Obr. 6-4: Náhradná schéma nelineárnej záťaže pripojenej do sústavy [14].....	31
Obr. 6-5: Možná impedančná charakteristika siete v bode spoločného napájania .....	32
Obr. 6-6: Deformácia prúdu na lineárnom spotrebiči vplyvom skresleného napätia pre a) kondenzátor, b) induktor, c) rezistor.....	33
Obr. 6-7: Vodivostné pásmo medeného vodiča pre a) vedenie DC prúdu, b) vedenie AC prúdu, c) vedenie AC prúdu s vysokofrekvenčnými zložkami .....	34
Obr. 6-8: Sumácia harmonických prúdov rádu $h=3n$ v strednom vodiči[14] .....	35
Obr. 6-9: Cirkulácia harmonických prúdov rádu $h=3n$ v primárnom vinutí $Dy$ transformátora.....	35
Obr. 6-10: Prúdové zákmity prúdu kondenzátorom ako dôsledok deformácie napätia. ....	39
Obr. 6-11: Konfigurácia siete umožňujúca paralelnú rezonanciu a jej náhradná schéma.....	40
Obr. 6-12: Priebeh paralelnej rezonancie .....	41
Obr. 6-13: Impedančná charakteristika s vyznačenými rezonančnými bodmi .....	42
Obr. 6-14: Sieťová konfigurácia s pravdepodobnosťou sériovej rezonancie, ekvivalentný obvod. ....	43
Obr. 6-15: Výkonový tetrahedrón.....	45
Obr. 7-1: Centrálna kompenzácia účinníka.....	55
Obr. 7-2: Schéma plynulo riadenej kompenzácie jalového výkonu dekompenzačnými tlmivkami [16].....	58
Obr. 7-3: Princíp aktívneho filtra[21].....	59
Obr. 7-4: Schéma chránenej kompenzácie.....	61
Obr. 7-5: Náčrt frekvenčných závislostí induktívnej reaktancie $X_L$ a kapacitnej reaktancie $X_C$ .....	63
Obr. 7-6: Impedančná charakteristika v mieste pripojenej chránenej kompenzácie .....	63
Obr. 7-7: Rezonančné zosilnenie pôsobením rôznych chránených kompenzácií [11] .....	64
Obr. 7-8: Schéma pasívneho filtra.....	66
Obr. 7-9: Impedančná charakteristika pri prítomnosti pasívneho filtra [13] .....	67
Obr. 7-10: Oddelená kompenzácia a filtrácia [24] .....	67
Obr. 8-1: PQ monitor Meg 30 a meracie transformátory prúdu s nastaviteľným rozsahom .....	69
Obr. 9-1: Priebeh činného / jalového výkonu ( $\text{tg } \varphi=1$ ) pre odmerané časové okno.....	74

---

<i>Obr. 9-2: Vývojový diagram ( 1 / 2 )</i> .....	79
<i>Obr. 9-3: Vývojový diagram ( 2 / 2 )</i> .....	80
<i>Obr. 10-1: Detail energie záznamníku</i> .....	81
<i>Obr. 10-2: Priebehy jalových výkonov</i> .....	83

## **ZOZNAM TABULIEK**

<i>Tab. 6-1 Príčiny zníženia kvality elektrickej energie</i> .....	27
<i>Tab. 6-2 Prispievanie harmonických komponentov do symetrických komponentov</i> .....	30
<i>Tab. 6-3 Šírka vodivostného pásma medeného vodiča v závislosti na frekvencii</i> .....	35
<i>Tab. 9-1 Hodnoty goniometrických funkcií</i> .....	74
<i>Tab. 9-2 Databázové skupiny stupňovitej kompenzácie</i> .....	75
<i>Tab. 9-3 Rozhodnutie o chránení kompenzácie</i> .....	77

# 1 ÚVOD

Elektrická energia je, s prihliadnutím na jej globálnu spotrebu, komodita s vysokou hodnotou. Z toho vyplýva zvýšený záujem o jej efektívne využívanie. Jedným z možností ako dosiahnuť vytýčený stav, je prenos len nevyhnutne potrebného (činného) výkonu cez vedenia elektrizačnej sústavy. Daný stav sa dá dosiahnuť rozumne navrhnutou kompenzačnou jednotkou realizovanou na krátku elektrickú vzdialenosť od konečného spotrebiča. Paralelná kompenzácia je nástroj na vykompenzovanie induktívneho jalového výkonu pripojením kondenzátorovej batérie, ktorá je nositeľom jalového výkonu kapacitného charakteru.

Vo väčšine odvetví je badateľný trend automatizovať proces návrhu. Takýto smer by sa mohol premietnuť aj do oblasti kompenzácie účinníku. Je však dôležité nájsť základňu, ktorá by to umožnila. Logicky tento status bude niest' merací prístroj, konkrétne analyzátor siete, ktorý poskytuje kvantum informácií zastrešujúcich aj údaje potrebné pre návrh kompenzácie.

Napriek zdanlivo priamočiaremu návrhu nie je v súčasných podmienkach algoritimizácia jednoduchá. V nedávnej minulosti sa začala premietat' do tejto oblasti iná samostatná sféra elektroenergetiky a tou je kvalita elektrickej energie, konkrétne ide o harmonické skreslenie napätia a prúdu.

Diplomová práca práve preto nechce zakotviť na teórii paralelnej kompenzácie. V jednotlivých kapitolách je vyhradený priestor pre uvažovanie problému harmonického skreslenia. Je nutné poznať, akým spôsobom vzniká, ako sa popisuje, aké sú nástroje na detekciu, resp. na eliminovanie nepriaznivých vplyvov na elektromagnetické okolie. Popisované teoretické poznatky napokon ústia do realizácie kompenzačných jednotiek, ktoré sú funkčne pripravené na prácu v prostredí s výskytom vyšších harmonických.

Z hľadiska samotného návrhu je nutné poznať pôvod, akým analyzátor siete dospeje k nameraným údajom. Typové označenie analyzátoru siete, s ktorým je pomyšľané pracovať, je Meg30. Tento prístroj bude popísaný z hľadiska použitej metódy vyhodnocovania elektrických veličín. Pre podloženie dôležitosti tohto kroku je možné uviesť nasledovný príklad. Návrh kompenzačnej jednotky môže byť prispôsobený meraniu celkového harmonického skreslenia v sieti, ktoré sa vyjadruje veličinou THD (Total Harmonic Distortion). Táto veličina je v normatívnom prostredí ČSN inak definovaná ako pre IEC. Preto je nutné poznať pozadie informácie, s ktorou sa pracuje.

Vo finálnej fáze budú teoretické vedomosti konštrukčne poskladané pre vytvorenie expertného systému algoritmizujúceho návrh kompenzácie účinníku.

## 2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Ako už bolo spomenuté v úvode, elektroenergetika je oblasť s rozsiahlym ekonomickým pozadím. To je všeobecne silný motív, ktorý pomáhal k rozvoji technológií podporujúcich hospodárne využívanie elektrickej energie. Do tejto oblasti zapadá aj problematika kompenzácie účinníku.

V súčasnosti sa kompenzácia elektrickej energie javí ako technologicky dobre zvládnutý nástroj, ktorý eliminuje negatívne dopady súvisiace s prevádzkovaním spotrebičov indukčného alebo kapacitného charakteru. Okolnosti budú priblížené v ďalšej kapitole.

Je nutné podotknúť, že klasická teória kompenzácie účinníku ako aj základné elektrotechnické definície uvažujú s lineárnym elektromagnetickým prostredím. Zjednodušene povedané, platia za predpokladu harmonickými priebehov okamžitých hodnôt napätí a prúdov. Ide aj o výkonovú teóriu, na základe ktorej je interpretovaná opodstatnenosť kompenzácie účinníku. Tento predpoklad však platí len parciálne. Pokrok elektrotechniky (napr. v oblasti výkonovej elektroniky) v minulom období so sebou priniesol elektrické prvky a systémy, ktoré svojimi dôsledkami spôsobujú deformáciu priebehu elektrických veličín.

Táto problematika je zastrešená samostatným sektorom elektrotechniky, ktorý sa nazýva Kvalita elektrickej energie. Záujem o oblasť kvality elektrickej energie bol podmienený dopytom po spoľahlivej dodávke elektrickej energie s vymedzenými parametrami. Dôvod je umocnený senzitivitou elektrických zariadení na nekvalitné napätie, čo sa môže premietnuť až do celkového zastavenia prevádzky, resp. vysokých ekonomických strát.

Aspekt kvality elektrickej energie začal ovplyvňovať prevedenie kompenzačných jednotiek. Dôvod spočíva najmä v prítomnosti hlavného prvku kompenzácie – kondenzátoru. Tento element elektrizačnej sústavy je citlivý na deformovaný priebeh napájacieho napätia, konkrétne na vyššie frekvenčné zložky napätia a následne prúdu. Okrem toho je kondenzátor významný zosilňovač šírenia harmonických signálov v sieti vďaka rezonančnej vlastnosti pri vzájomnej interakcii so sieťovou impedanciou (indukčného charakteru). Preto je potrebné ošetriť kompenzáciu z dvoch hľadísk. Jednak z pohľadu ochrany kompenzácie voči vyšším harmonickým, na druhej strane je potrebné zaistiť, aby prevádzkovaná kompenzácia nebola zdrojom zosilnenia deformácie elektrických veličín v sieti. Metódy na ošetrenie oboch uhl'ov pohľadu sa rozvíjajú. Existujú 2 hlavné prístupy, keď odhliadneme od určitých jemných riešení (nepoužiteľných pre rozsiahle aplikácie). Tými sú aktívne a pasívne filtre. Hlavne tá druhá kategória si vyžaduje na mieru šité vyhotovenie, ktoré musí podliehať meraniu a tak trochu predikcii vývoja harmonického skreslenia po pripojení kompenzačného zariadenia.

Základným prostriedkom pre vyhodnotenie systémových okolností určujúcich vyhotovenie kompenzačnej jednotky môže byť analyzátor siete. Práve ten by mohol vytvoriť platformu pre automatizovanie procesu návrhu kompenzácie. Takýto expertný systém zatiaľ neexistuje. Je potrebné zobrať do úvahy, že elektrizačná sústava je rozsiahla a zložitá spleť vzájomne ovplyvňujúcich prvkov. To je limitujúci faktor, na základe ktorého je náročné predpovedať frekvenčnú závislosť siete po pripojení kondenzátoru.

### 3 CIELE PRÁCE

Ciele diplomovej práce boli vytýčené pre dve roviny. Tou prvou je vytvorenie kvalitnej príručky k téme Kvalita elektrickej energie a kompenzácia účinníka v harmonicky skreslenom prostredí. Autor sa snaží o tento míľnik v snahe zavŕšiť vysokoškolské štúdium teoretickým prínosom v oblasti, na ktorú sa počas posledných rokov špecializoval.

Význam tejto méty sa zvyšuje prihliadnutím na obmedzený počet literatúry uvažujúcej náväznosť kompenzácie na harmonické skreslenie v sieti. Takéto úzkoprofilové cudzojazyčné materiály je nutné premietnuť do práce.

Na druhej strane stojí snaha o rozvoj návrhu kompenzácie účinníku. Cieľom je jej algoritimizácia na základe merania analyzátoru siete. Postupnosť krokov musí zobrať do úvahy ovplyvňujúce faktory definované v teoretickej stati. Je potrebné kvantitatívne determinovať tieto činitele, k čomu je nevyhnutné poznať rozsah a pozadie údajov od analyzátoru siete.

Stručne vystihuje ciele práce jej zadanie, ktoré je nasledovné.

1. Teória výkonu a paralelná kompenzácia
2. Údaje poskytované vybraným analyzátorom siete a možnosť ich využitia.

## 4 METÓDY A POSTUPY RIEŠENIA

Príprava diplomovej práce sa nepriamo zahájila teoretickým bádáním problematiky. Poznanie zaujatosti autora k tejto téme prinieslo otázku voľby témy ako aj konzultačného zázemia. Ako účinným a dynamickým postupom pri riešení všeobecnej témy je premostenie akademickej a priemyselnej sféry.

Jedným pilierom je firma MEG A a.s. so sídlom v Brne, ktorá sa zaoberá prevažne monitorovaním parametrov kvality elektrickej energie. Pri spolupráci na diplomovej práci ju reprezentuje riaditeľ spoločnosti, p. Doc. Pospíchal. Druhým oporným bodom je Ústav elektroenergetiky zastúpený vedúcim Diplomovej práce, p. Ing. Drápelom.

Po nadobudnutí potrebného množstva informácií sa otvára priestor pre návrh expertného systému. Musí mu predchádzať analýza meracieho prístroja MEG 35.

Vo finálnej fáze sa musí otestovať navrhnutý algoritmus a overiť jeho použitie pre rôzne systémové stavy.

## 5 PARALELNÁ KOMPENZÁCIA V LINEÁRNOM ELEKTROMAGNETICKOM PROSTREDÍ

Táto kapitola je venovaná teoretickým vedomostiam, ktoré sa viažu k problematike kompenzácie jalového výkonu pri neuvažovaní harmonického skreslenia v sieti. To znamená, že časovú závislosť okamžitých hodnôt prúdov a napätí vyjadruje harmonický priebeh s frekvenciou 50Hz. Úvod kapitoly pojednáva o výkonovej teórii (Budeanuovej). Ďalej nasleduje súhrn dôsledkov prevádzkovania nevykompenzovaného odberu. Stať bude zavŕšená možnosťou riešenia nepriaznivého stavu kompenzáciou účinníka. Nakoniec prebehne porovnanie pomerov pred a po kompenzácii pri zohľadnení aspektov strát a úbytkov napätí.

### 5.1 Výkony v lineárnom prostredí

Pre ilustratívnosť sú definované jednofázové výkony lineárnej záťaže napájanej harmonickým napätím s frekvenciou 50Hz.

*Poznámka: Pre výpočet trojfázových výkonov je pri symetrickej sústave možné jednofázové výkony vynásobiť tromi alebo pri nesymetrii vykonať súčet jednotlivých jednofázových výkonov.*

Lineárna záťaž sa vyznačuje lineárnou VA charakteristikou. Z toho vyplýva, že pri napájaní sínusovým napätím bude záťaž odoberať sínusový prúd.

Takýto spotrebič odoberá zo zdroja okamžitý výkon s hodnotou vyjadrenou vzťahom (5.1).

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (\text{W}; \text{V}, \text{A}) \quad (5.1)$$

kde periodické sínusové napätie sa vyjadří ako:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{V}; \text{V}) \quad (5.2)$$

kde  $U_m$  vyjadruje amplitúdu napätia.

Cez lineárny spotrebič charakterizovaný impedanciou  $\bar{Z} = Z \angle j$  ( $\Omega$ ) bude prechádzať prúd podľa (5.3).

$$i(t) = \frac{u(t)}{\bar{Z}} = \frac{u(t)}{R + jX} = I_m \cdot \sin(\omega t - j) \quad (5.3)$$

Pre ďalšiu prehľadnosť sa uvedú definície pre efektívne hodnoty napätia a prúdu harmonických priebehov.

$$U = \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\int_0^T u(t)^2 dt} = \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\int_0^T (U_m^2 \cdot \sin^2(\omega t)) dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (5.4)$$



$$I = \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\int_0^T i(t)^2 dt} = \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\int_0^T (I_m \cdot \sin^2(\omega t)) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (5.5)$$

Pri (5.5) sa uvážila nulová hodnota uhlu zaťažovacej impedancie  $\varphi$ . Teraz sa vzťahy (5.2), (5.3) dosadia do (5.1).

$$p(t) = U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - j) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot [\cos j + \cos(2\omega t + j)] \quad (5.6)$$

Pri pohľade na vzťah (5.6) je vidieť, že sa skladá z dvoch častí, a to časovo nezávislej a závislej. Prvý diel sa dá vyjadriť podľa (5.7) a nazýva sa činný výkon.

$$P = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot (\cos j) = U \cdot I \cdot (\cos j) \text{ (W)} \quad (5.7)$$

Činný výkon sa všeobecne definuje pomocou (5.8). Vzťah vypovedá o tom, že P je strednou hodnotou okamžitého výkonu pre dobu T. Ako dôkaz môže poslúžiť výsledok vzťahu (5.9). Po dosadení (5.2), (5.3) do (5.8) sa dospeje k výsledku, ktorý je zhodný s (5.7).

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \text{ (W)} \quad (5.8)$$

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - j) dt = U \cdot I \cdot \cos j \text{ (W)} \quad (5.9)$$

Činný elektrický výkon sa v spotrebiči nevratne spotrebuje, to znamená, že sa premení na iný druh energie.

Ďalšia časť vzťahu (5.6) sa nazýva kmitavá a je časovo závislá. Kmitá s dvojnásobnou frekvenciou (v porovnaní so základnou frekvenciou), s amplitúdou rovnajúcou sa súčinu efektívnych hodnôt prúdu a napätia. Stredná hodnota tejto zložky počas jednej periódy je rovná nule. [9]

Je dôležité si zdefinovať ďalší druh výkonu, ktorý sa nazýva zdanlivý výkon. Vyjadruje sa nasledovne.

$$S = U \cdot I \text{ (VA; V, A)} \quad (5.10)$$

Zdanlivý výkon predstavuje hodnotu, ktorú by mohol dosiahnuť činný výkon pri rovnakej hodnote fáze prúdu a napätia.

Ak je v obvode pripojená impedancia s obecným induktívnym alebo kapacitným charakterom, hodnota uhlu zaťažovacej impedancie  $\varphi$  bude nenulová, a koncepcia vzťahov (5.9), (5.10) spôsobí, že činný výkon bude mať menšiu hodnotu ako zdanlivý výkon.

Rozdiel medzi činným a zdanlivým výkonom je taktiež badateľný z rovnice (5.6). Vytvára ho kmitavá zložka.

Pre matematické zavŕšenie výkonových vzťahov bola zavedená fiktívna veličina s názvom jalový výkon. Je daný vzťahom (5.11).

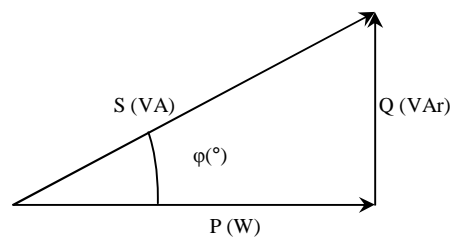
$$Q = U \cdot I \cdot \sin j \quad (\text{VAr}; \text{V}, \text{A}, -) \quad (5.11)$$

Ako už bolo spomenuté, kmitavá zložka okamžitého výkonu má nulovú strednú hodnotu pre jednu periódu. Žiadna práca sa teda nekoná a to je dôvod, prečo je možné pri presnom ponímaní fyzikálnych zákonov považovať pojem jalový výkon za irelevantný. Avšak pre elektrotechniku je užitočnou pomocnou veličinou.

Vzájomné vzťahy výkonov sú nasledovné.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{VA}; \text{W}, \text{VAr}) \quad (5.12)$$

Uvedená rovnica sa dá graficky znázorniť výkonovým (pravouhlým) trojuholníkom.



Obr. 5-1: Výkonový trojuholník

Hodnota uhlu zaťažovacej impedancie  $\varphi$  je zároveň veľkosťou fázového posuvu medzi napätím a prúdom.

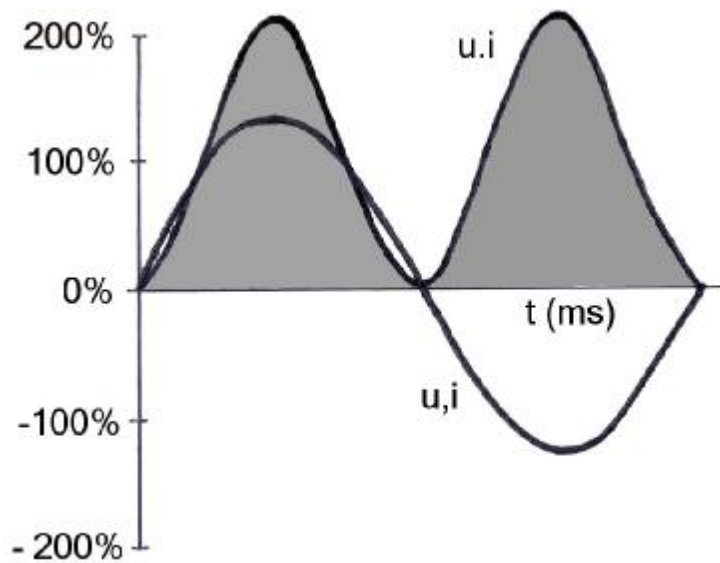
Pre vyjadrenie výkonových vzťahov sa v prevažnej miere používa účinník  $\cos \varphi$ . Je vyjadrený ako pomer činného výkonu a zdanlivého výkonu. Inak povedané, vyjadruje pomer reálneho užitočného výkonu a výkonu, ktorým je sústava zaťažovaná pre vykonanie danej práce.

$$\cos j = \frac{P}{S} \quad (\text{W}; \text{V}, \text{A}) \quad (5.13)$$

Čím je uhol  $\varphi$  rôznejší od nuly (fázový posun medzi  $u(t)$  a  $i(t)$  je väčší), tým je  $\cos \varphi$  nižší a jalový výkon prenášaný v sieti vyšší. Naopak, ak je  $\cos \varphi = 1$ , sieť nie je zaťažovaná žiadnym jalovým výkonom a odber elektrickej energie prebieha s maximálnou efektivitou. Účinník je párna funkcia, čiže záporný a kladný fázový posuv rovnakej absolútnej hodnoty vedú k rovnakej hodnote  $\cos \varphi$ . Rozlišuje sa však medzi  $\cos \varphi_{\text{cap}}$  a  $\cos \varphi_{\text{ind}}$ .

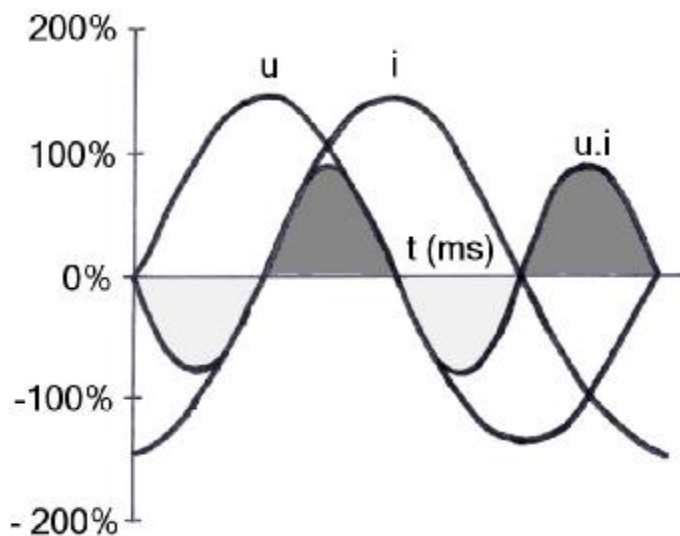
Je zrejmé, že hodnota  $\varphi$  je závislá na type záťaže. Pre objasnenie podstaty jalového výkonu sa predstavujú výkonové súvislosti pre typizované záťaže.

- Ohmická záťaž, ktorá môže byť reprezentovaná lineárnym rezistorom. Ak zapojíme do siete rezistor, sínusové priebehy okamžitých hodnôt napätia a prúdu budú vo fáze ( $\varphi = 0$ ). Takýto spotrebič odoberá zo siete len činnú energiu, ktorá sa následne premieňa na iný druh energie (teplo). Veľkosť činného a zdanlivého výkonu sú podľa (5.7), (5.10) rovnaké, keďže je hodnota  $\varphi$  nulová. Uvedené je vyznačené na obr.5-2, kde plná plocha reprezentuje činný aj zdanlivý výkon.



Obr. 5-2: Činný výkon  $P$  odporovej záťaže [11]

- Rýdza indukívna záťaž, ktorá môže byť realizovaná ideálnou tlmivkou. Priebeh okamžitých hodnôt prúdov zaostáva za priebehom napätia o  $\varphi = 90^\circ$ . Z toho dôvodu, dvakrát za periódu budú mať priebehy okamžitých hodnôt výkonu kladnú polaritu a dvakrát zápornú (obr. 5-3).



Obr. 5-3: Oscilujúce jalové výkony  $Q$  indukčnosti[11]

Počas doby, kedy je okamžité napätie a prúd sverne kladné alebo záporné, **odoberá spotrebič energiu**, keďže súčin okamžitej hodnoty napätia a prúdu (výkon) je kladný. Ak však majú okamžité hodnoty rôzne znamienka, okamžitý výkon je záporný a tlmivka sa počas tejto doby správa ako **zdroj elektrickej energie**. Induktor teda počas jednej štvrtperiódy absorbuje v sebe energiu, ktorú počas druhej štvrtperiódy vracia späť do elektrizačnej sústavy. Integrály výkonov pod a nad časovou osou sú si rovné, teda činný výkon je nulový. Nedochoádza k premene elektrickej energie na iný druh energie v ideálnom spotrebiči. Osciláciou výkonového toku však dochádza k zaťažovaniu prenosového vedenia. Napriek tejto

negatívnej vlastnosti je jalový výkon potrebný na prevádzkovanie väčšiny elektrických zariadení. [11]

- Rýdza kapacitná záťaž, ktorá môže byť predstavovaná ideálnou kapacitou ( $\varphi = -90^\circ$ ). Priebieh okamžitých hodnôt prúdov predbieha priebieh napätia o 90 stupňov. Kapacita sa k indukčnosti správa inverzne, ale znova nie je konaná žiadna činná práca. Celkový integrál výkonu za jednu periódu je nulový.

Uvedené príklady boli analyzované pri uvažovaní ideálnych prvkov (každý elektrický prvok obsahuje určitú parazitnú rezistanciu, kapacitu, indukčnosť). Napriek tomu sú demonštratívne. Predostrená výkonová teória má relatívne vysoký vek (Budeanu, 1927), avšak vyhovuje v prostredí bez harmonického skreslenia.

## 5.2 Dôsledky prevádzkovania spotrebičov s $\cos \varphi < 1$

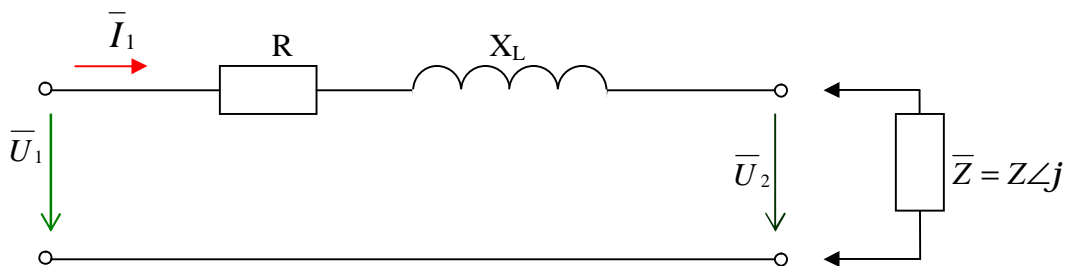
Ak spotrebiteľ prevádzkuje zariadenie, ktorého menovitý účinník je nižší ako 1, má to nasledovné dôsledky pri jednofázovom napájaní.

- Výkon prenášaný v sieti spôsobuje vyššie straty ako pri  $\cos \varphi = 1$ . Toto tvrdenie sa dá podložiť vzťahom pre prenosové straty (5.14). Z neho je zrejmé, že pri poklese  $\cos \varphi$  sa zvýši  $\Delta P$ .

$$\Delta P = 2 \cdot R \cdot (I_\epsilon^2 + I_j^2) = 2 \cdot R \cdot \left( \frac{I_\epsilon^2}{\cos^2 \varphi} \right) \quad (5.14)$$

Iným odôvodnením zvýšených prenosových strát je tvrdenie, že prenosové vedenie je zaťažované okrem činného výkonu aj jalovým výkonom.

- Ďalším dôsledkom je vplyv na úbytok napätia v sieti. Pri uvažovaní prenosového vedenia (Obr. 5-4) charakterizovaného pomocou rezistancie  $R$  a induktívnej reaktancie  $X_L$ , je úbytok napätia na vedení daný vzťahom (5.15).

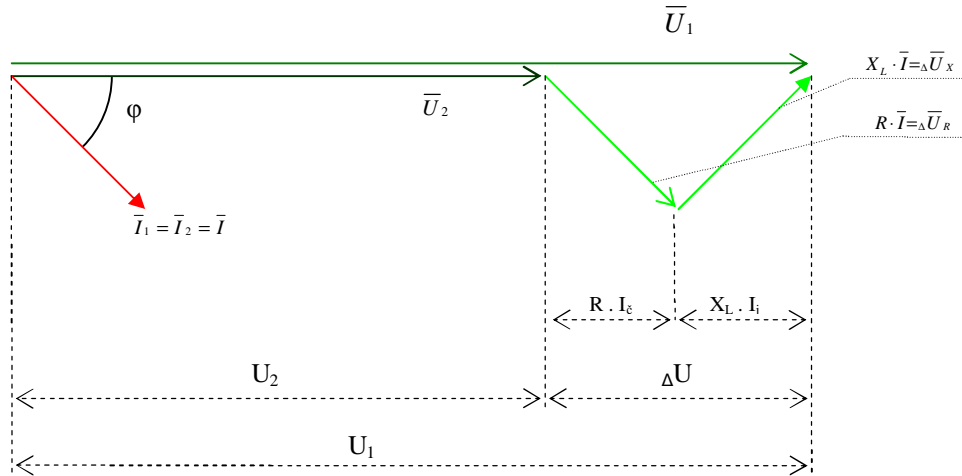


Obr. 5-4: Náhradná schéma prenosového vedenia

$$\Delta U = R \cdot I_\epsilon + X_L \cdot I_j = R \cdot I_\epsilon + X_L \cdot I_\epsilon \cdot \text{tg} \varphi \quad (5.15)$$

Vzťah je odvodený z fázorového diagramu (FD) na obr. 5-5, ktorý prislúcha zjednodušenej schéme vedenia nízkeho napätia (obr. 5-4). Pri konštrukcii FD sa uvažovali nasledovné predpoklady.

- Pre vedenie nn sa uvažoval pomer  $R : X_L = 1:1$ , čo môže zodpovedať reálnej situácii.
- Napájaný spotrebič induktívnej povahy bude mať zaťažovací uhol impedancie  $\varphi = 45^\circ$ .



Obr. 5-5: Fázorový diagram pre nekompenzované vedenie

Obrázok 5-5 poskytuje predstavu o tom, ako zaťažovací uhol impedancie spotrebiča ovplyvňuje napäťové pomery. Najčastejšie sa prevádzkujú induktívne spotrebiče, čo vedie k úbytkom napätia. S rastom zaťažovacieho uhlu induktívnej reaktancie  $\varphi$  narastá úbytok napätia. Na druhej strane, v prípade kapacitného charakteru záťaže, dochádza k nárastu napätia. Typickým príkladom je prevádzkovanie výbojkových svetelných zdrojov, kde kompenzačná kapacita prevyšuje jej induktívnu reaktanciu. Iným príkladom z oblasti prenosu a distribúcie je stav, ak kapacita vedenia dominuje nad jej induktívnou reaktanciou. Tento stav nastane, ak je cez vedenie prenášaný výkon pod prahom prirodzeného výkonu. Extrémom je chod siete naprázdno (Ferrantiho jav).

- Tretím následkom je nižšia zaťažiteľnosť elektrizačnej sústavy podľa vzťahu (5.16). Ten vyjadruje, že pri poklese  $\cos \varphi$  narastie hodnota pravej strany rovnice. Tá má kulminovať len po hranicu dovoleného prúdového zaťaženia inštalácie  $I_{DOV}$ . To znamená, že nižší účinník môže spôsobovať opätovné výpadky napr. hlavného istiaceho prvku inštalácie alebo môže spôsobiť preťaženie distribučného transformátora.

$$I_{DOV} \geq \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi} \quad (5.16)$$

Distribučné spoločnosti spravujúce sieť vnímajú spomenuté tri dôsledky prenosu výkonu s účinníkom  $\cos \varphi < 1$  ako negatíva. Je to pochopiteľné, pretože:

1. DS garantujú určitý napäťový koridor na svorkách konečného spotrebiteľa, napr.  $U_N \pm 10\%$ . Zvýšené úbytky napätí v dôsledku  $\cos \varphi < 1$  sťažujú kontinuálne dosahovanie správneho napätia.

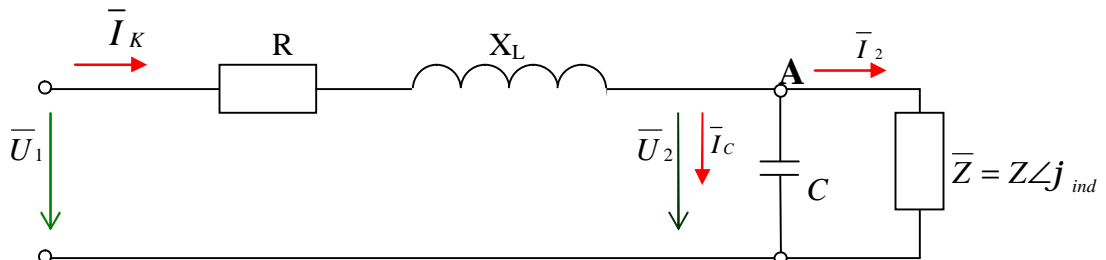
2. Vyššie prenosové straty redukujú efektivitu prenosu a tým aj vlastný ekonomický výsledok.
3. Znižuje sa rezerva zaťaženia, to znamená, že distribučný transformátor bude skôr preťažovaný pri prenose výkonu s  $\cos \varphi < 1$  ako pri  $\cos \varphi = 1$ .

Voči týmto negatívam sa rozvodné závody bránia a vyžadujú od veľkoodberateľov elektrickej energie, aby odoberali výkon s predpísaným účinníkom  $\cos \varphi$ . Podľa Energetického zákona č. 222/1994 Zb. (458/2000) je odberateľ povinný dodržiavať účinník v rozsahu 0,95 – 1, pokiaľ nie je dohodnuté inak. Riešenie v merítke maloodberateľov je zastrešené distribučnou spoločnosťou.

Práve spôsob riešenia, t.j. uvedenie účinníku odberu do správneho koridoru, bude predmetom záujmu nasledujúcej kapitoly.

### 5.3 Riešenie nevhodného $\cos \varphi$ – kompenzácia účinníka

Riešenie v hladine nn spočíva v realizácii paralelnej kompenzácie. V bode blízko miestu spotreby, sa pripája paralelne k záťaži kondenzátor alebo tlmivka s jalovým výkonom, ktorý vykompenzuje jalový výkon záťaže. V prípade záťaže induktívnej povahy sa pripája kondenzátorová batéria s jalovým kapacitným výkonom, ktorý má rovnakú absolútnu hodnotu, ako jalový induktívny výkon záťaže. Uvedené je demonštrované na obr. 5-6.



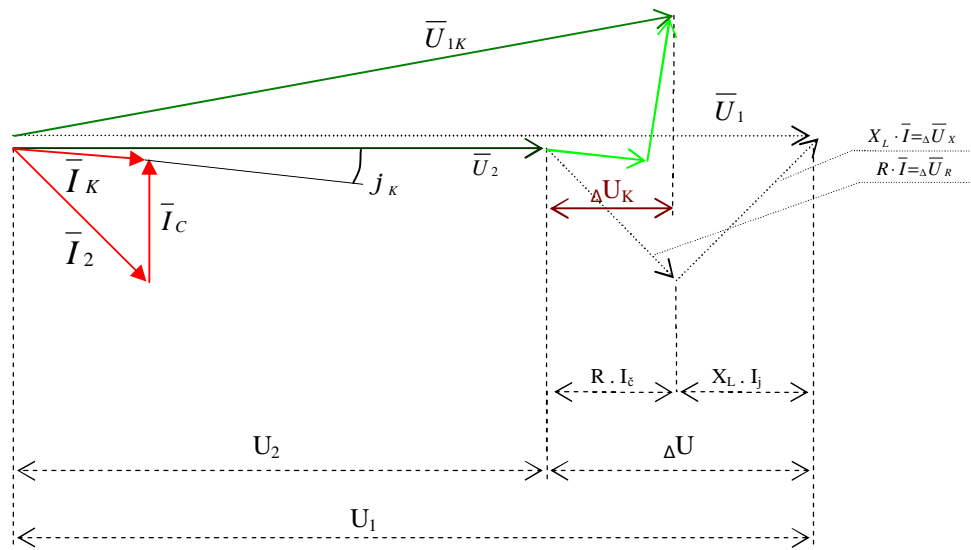
Obr. 5-6: Paralelná kompenzácia – náhradná schéma

Pri menej častom jave, ak je záťaž kapacitnej povahy, sa pripája tlmivka so zodpovedajúcim jalovým výkonom. Toto riešenie sa nazýva dekompenzácia.

Ak je jalový výkon kompenzačného prostriedku rovnaký s jalovým výkonom záťaže a majú pritom opačný charakter, výkon prenášaný v sieti až po hranicu A na obr. 5-6 je rýdzo činný. To je stav, keď sú úbytky napätia vplyvom záťaže a prenosové straty na vedení minimalizované (obr. 5-7). Fázorový diagram poukazuje na to, že celkový prúd cez vedenie až po bod „A“ (miesto kompenzácie) sa znížil z hľadiska absolútnej hodnoty. Účinník sa tiež zlepšil. Toto je dané súčtom fázorov prúdov podľa (5.17)

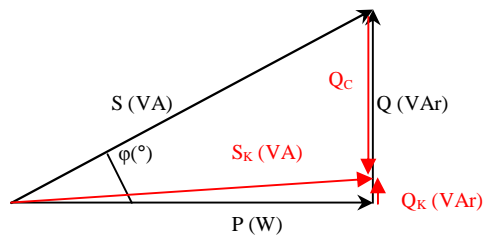
$$\bar{I}_K = \bar{I}_2 + \bar{I}_C \quad (5.17)$$

Dôsledok rovnice (5.17) spočíva v znížení úbytku napätia na vedení oproti nekompenzovanému stavu, a teda vedie k lepším napäťovým pomerom v mieste inštalácie (uvedený fázorový diagram uvažuje napätie na konci vedenia za konštantné).



Obr. 5-7: Efekt paralelnej kompenzácie, fázorový diagram

Podľa vzťahu (5.16) sa zvýšila zaťažiteľnosť vedenia a straty sa znížili (5.14). Toto tvrdenie sa dá podložiť aj často používaným výkonovým trojuholníkom. Efekt kompenzácie je z tohto pohľadu vyobrazený na obr. 5-8. Dodaním kapacitného jalového výkonu  $Q_C$  pomocou kompenzačných kondenzátorov sa prenášaný výkon zníži na hodnotu  $S_K$ .



Obr. 5-8: Efekt paralelnej kompenzácie – výkonový trojuholník

Kompenzačné zariadenie má svoje pole pôsobnosti smerom k zdroju. To znamená, že prenášaný výkon medzi kompenzačným zariadením a samotným spotrebičom ostáva nezmenený.

## 6 NELINEÁRNE ELEKTROMAGNETICKÉ PROSTREDIE

Vývoj elektrotechniky so sebou prináša potrebu prispôbiť aj oblasť kompenzácie elektrickej energie súčasným podmienkam.

Stále rastúci počet zdrojov harmonického skreslenia v sústave kladie na pojednávanú problematiku nové nároky. Tým je v prvom rade schopnosť zariadenia pracovať v harmonicky skreslenom prostredí. Podľa potreby by vo vyššej úrovni mal byť kompenzačný prostriedok prispôsobený k napomáhaniu eliminácie harmonického skreslenia v sieti.

Pri širšom pohľade na kompenzačné zariadenia je zrejmé, že funkčnosť systému je daná dielčimi prvkami, ktoré sú vystavené nepriaznivým vplyvom elektrizačnej sústavy. Kompenzačné komponenty majú pre svoju činnosť najvýhodnejšie podmienky, ak sú splnené podmienky Kvality elektrickej energie. Tie sú určené efektívnou hodnotou napájacieho napätia, frekvenciou sieťového napätia, harmonickým priebehom skutočných hodnôt napájacieho napätia, ako aj symetriou trojfázovej sústavy. Hraničné hodnoty pre kvalitu napätia sú uvedené v norme ČSN EN 50160. Kvalita elektrickej energie je znížená, ak sa charakteristické hodnoty napätia vynímajú z požadovaného pásma. Na kompenzačné zariadenie je kladený nárok funkčnosti aj pri zníženej kvalite elektrickej energie (najmä z hľadiska harmonického skreslenia). Nasledujúca časť je preto venovaná prehľadu oblastí záujmu Kvality elektrickej energie.

### 6.1 Úvod ku Kvalite elektrickej energie

Už dlhú dobu je elektrická energia kľúčovým nástrojom civilizácie pre uspokojovanie základných a odvodených potrieb. Vo väčšine priemyselných odvetví sa elektrická energia stala najdôležitejším výrobným faktorom určujúcim ekonomickú efektívnosť. Je to špeciálna komodita, ktorá sa vo veľkom množstve nedá skladovať a kvalita produktu sa nedá odskúšať pred jeho použitím. Elektrina je teda typickým predstaviteľom „just in time“ produktu. [15]

Kvalita elektrickej energie je pomerne nové odvetvie v rámci elektroenergetiky, ktoré uvažuje pôsobenie celej elektrizačnej sústavy. Cieľom tohto sektoru je dosiahnuť stav, kedy je elektrická energia vždy dostupná a stále je v požadovanom rozsahu napätí, frekvencie. Trojfázová sústava je symetrická a napätie má harmonický priebeh.

Zvyšujúca sa snaha o dosiahnutie uvažovaného stavu má nasledovné príčiny:

- Elektrické zariadenia sú citlivejšie na zníženie kvality dodávky elektrickej energie. Trend počtu týchto prvkov v elektrizačnej sústave je rastúci. Citlivosť dielčieho elektrického zariadenia (napr. počítačovej jednotky) môže byť spätá s celkovou výrobou a napokon aj s ekonomickými ukazovateľmi. Ako príklad je možné uviesť krátky napäťový pokles, ktorý vyústi v reštartovaní PC ovládajúceho výrobnú linku v papierenských závodoch. Výrobná linka sa len nachvíľu zastaví, ale keďže procesy sú presne synchronizované s ostatnými výrobnými postupmi, celá produkcia sa musí zastaviť. Očistenie a následné naštartovanie výroby môže trvať niekoľko hodín, čo má za následok vysoké ekonomické straty. Iným



príkladom citlivosti výrobného procesu na kvalitu elektrickej energie môže byť výroba polovodičových súčiastok. Výroba trvá niekoľko dní, jednotlivé subprocesy sú od seba závislé a výpadok, resp. nesprávna funkčnosť niektorého výrobného aparátu sa premietne do vysokých peňažných strát. Zo sféry zdravotníctva je možné upozorniť na vyspelú biomedicínsku techniku, ktorá je však často slabo ošetrovaná z hľadiska odolnosti na zníženú kvalitu elektrickej energie.

- Elektrické zariadenia sa stále intenzívnejšie podieľajú na znížení kvality elektrickej energie. Napájanie spotrebičov cez výkonové meniče deformuje priebeh prúdu, ktorý sa premietne do deformácie priebehu napájacieho napätia v sústave. Uvedený výsledok ovplyvní všetkých odberateľov napojených z daného uzlového bodu.

Kvalita elektrickej energie môže byť interpretovaná ako dodávateľsko - odberateľská interakcia. Ako už vyplynulo z predošlej časti, široká vrstva konzumentov je citlivá na kvalitatívne parametre elektriny. Dodávateľ elektrickej energie má náročnú úlohu zabezpečiť prísun elektrickej energie v požadovaných parametroch. Elektrina ako produkt, sa vyrába ďaleko od miesta spotreby a je dodávaná cez mnoho kilometrov prenosových vedení a transformátorov. Prevádzka týchto úsekov často nie je ani v kompetencii dodávateľa elektrickej energie. Na druhej strane je často spotrebiteľská skupina zodpovedná za zníženie kvality elektrickej energie. To sú činitele komplikujúce dodávateľské ciele. Všeobecne platí, že odberatelia sú zodpovední za prijatie takých opatrení, ktoré zabezpečia požadovanú úroveň kvality dodávky elektrickej energie. [15]

Kvalita elektrickej energie je charakterizovaná kvalitou napätia. Problémy s ňou sú kategorizované do dvoch hlavných podskupín. Medzi prvú patria deje, pri ktorých sa efektívna hodnota napätia nelíši od menovitej hodnoty o viac ako 10%. Sú to napät'ové variácie. Druhou skupinou, ktorá presahuje tento rámec, sú napät'ové udalosti.

Tab. 6-1 Príčiny zníženia kvality elektrickej energie

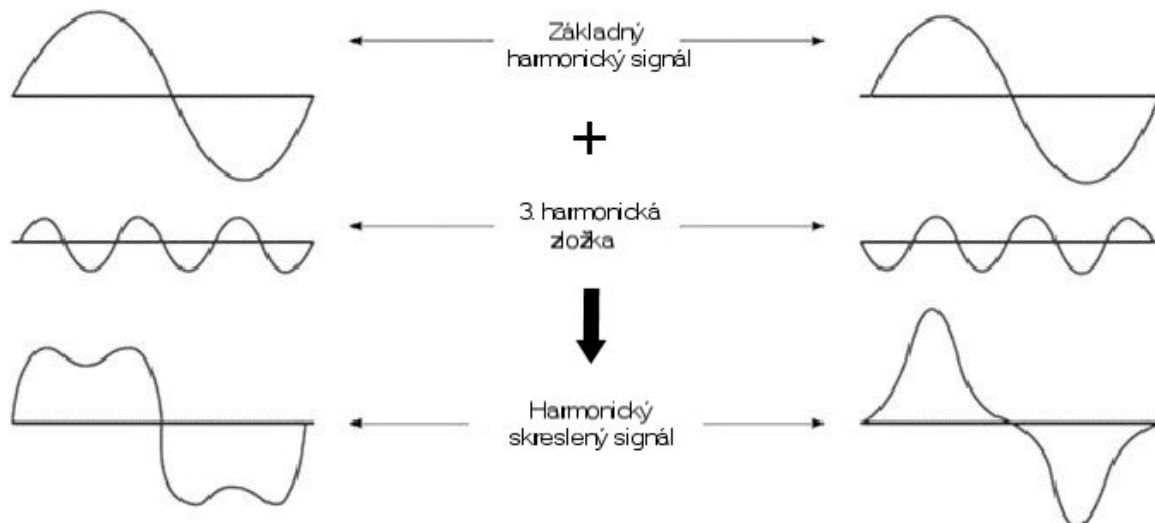
Napät'ové variácie	Napät'ové udalosti
Kolísanie napätia	Prerušenie napätia
Deformácia priebehu napätia	Poklesy napätia
Zmena frekvencie	Zvýšenie napätia
Nesymetria 3f sústavy	Prechodné deje

Z hľadiska vplyvu oblasti Kvality elektrickej energie na problematiku kompenzácie jalového výkonu je najzávažnejšia deformácia napätia. Preto k nej práca ústi v nasledovnej kapitole.

## 6.2 Harmonické skreslenie v elektrizačnej sústave

O dôležitosť javu harmonického skreslenia sa v najväčšej miere podieľa rastúci počet nelineárnych elektrických prvkov, ktoré sú reprezentované najmä produktmi z oblasti výkonovej elektroniky. Ak je spotrebič s nelineárnou volt-ampérovou charakteristikou pripojený na napájací

bod so sínusovým napätím, prúd pretekajúci záťažou nemá sínusový priebeh okamžitých hodnôt. Ak je tento prúd periodický, ale neharmonický, nazýva sa harmonicky skreslený prúd. Cez elektrický spotrebič preteká prúd, ktorý sa dá interpretovať ako suma harmonických signálov s frekvenciami, ktoré sú celočíselnými<sup>1</sup> násobkami základnej frekvencie (párne násobky základnej harmonickej sú zriedkavé a obyčajne súvisia s poruchovým stavom). Jednotlivé prúdové signály vytvárajú harmonické komponenty. Toto je v súlade s Fourierovým rozkladom. Uvedené je demonštrované na obr. 6-1.



Obr. 6-1: Rozklad harmonicky skresleného signálu na harmonické komponenty [19]

Logickým dôsledkom je tok harmonicky skresleného prúdu cez prenosové vedenia, kde spôsobuje úbytky napätí, ktoré sú taktiež neharmonické periodické. Následne sa to premieta do deformácie napájacieho napätia, ktoré vnímajú aj ostatní spotrebitelia.

Harmonické zložky napätí spôsobujú ťažkosti hlavne pre frekvenčne citlivé zariadenia. Jednou z hlavných obetí sú kompenzačné kondenzátory. Ich hyperbolická funkčná závislosť impedancie na frekvencii spôsobuje, že impedancia výrazne klesá pre vyššie harmonické frekvencie. Pri nešetrenej kompenzácii môže ľahko dôjsť k preťaženiu a následne k zničeniu kompenzačného kondenzátora. Otázka riešenia tohto problému bude zodpovedaná v neskoršej časti práce.

### 6.2.1 Kvantitatívne vyjadrenie harmonického skreslenia

Skreslený priebeh sa môže kategorizovať do troch podskupín:

- Harmonické skreslenie
- Medziharmonické skreslenie
- Neperiodické skreslenie

<sup>1</sup> Ak sa uvažuje suma signálov, ktorých frekvencie sa rovnajú neceločíselným násobkom základnej harmonickej, jedná sa o medziharmonický (interharmonický) signál.

Pozornosť sa bude upierať o harmonické skreslenie. Ako už bolo spomenuté, harmonicky skreslený periodický signál sa dá pomocou Fourierovho rozvoja rozložiť na sumu harmonických komponentov. Jednotlivé subsignály majú frekvencie, ktoré sú celočíselnými násobkami základnej harmonickej frekvencie.

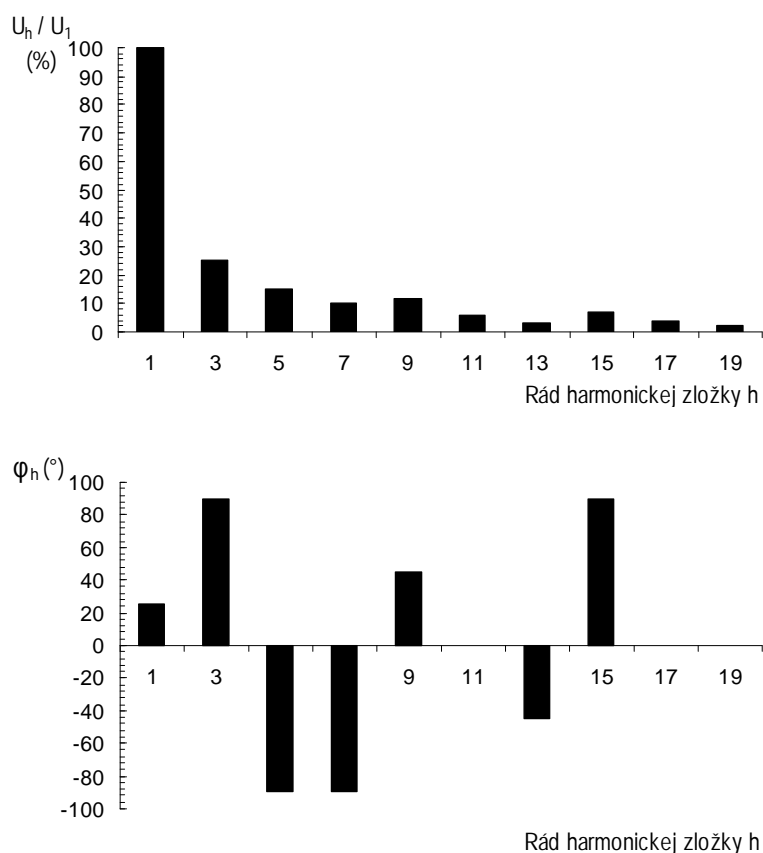
Výsledná okamžitá hodnota deformovaného prúdu sa potom dá vyjadriť podľa (6.1) a napätia podľa (6.2).

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^H I_h \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t - j_h) \quad (6.1)$$

$$u(t) = U_0 + \sum_{h=1}^H U_h \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t - j_h) \quad (6.2)$$

Kde:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ ,  $f_0$  je základná harmonická frekvencia (50Hz / 60Hz),  $I_0$  a  $U_0$  sú jednosmerné komponenty signálov,  $h$  vyjadruje rád harmonickej zložky,  $\varphi_h$  určuje fázový posun h-tej harmonickej voči prvej harmonickej zložke,  $I_h$  a  $U_h$  sú efektívne hodnoty signálov.

Intenzita harmonického skreslenia je hodnotená v dvoch úrovniach. Tou prvou je vyjadrenie relatívnej amplitúdy a fázy harmonickej zložky voči základnej harmonickej. Výsledkom je harmonické amplitúdové a harmonické fázové spektrum (obr. 6-2).



Obr. 6-2: Harmonické amplitúdové a fázové spektrum

Druhou metódou hodnotenia je určenie celkového harmonického skreslenia (THD). Vyjadruje sa rozlične pre rôzne normatívne prostredia.

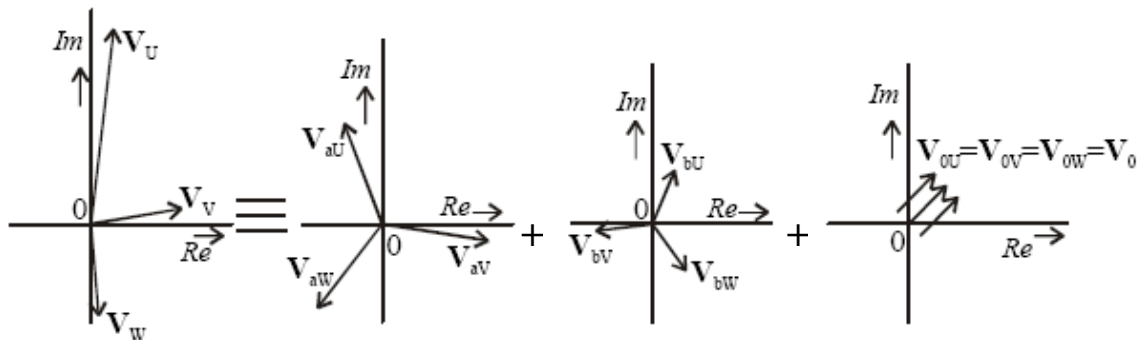
$$THD_{U(\check{C}SN)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (\%; V, V) \quad (6.3)$$

$$THD_{U(IEC)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_h^2}}{U} \cdot 100 \quad (\%; V, V) \quad (6.4)$$

Rozoznáva sa celkové harmonické skreslenie prúdu (THDi) a napätia (THDu).

Normatívne prostredie ČSN stanovuje maximálne celkové harmonické skreslenie napätia  $THDu \leq 8 \%$  pre verejné napájacie siete nn.

V elektroenergetike rozsiahlo používaný aparát rozkladu nesymetrickej trojfázovej sústavy na tri symetrické sústavy (obr. 6-3) sa môže aplikovať aj pri harmonicky skreslených signáloch. Každá zo symetrických sústav (súsledná, spätná, netočivá) má špecifický charakter vplyvu na elektrické zariadenie.



Obr. 6-3: Rozklad nesymetrickej sústavy na súsledné sústavy [23]

Jednotlivé harmonické komponenty signálu prispievajú podľa rádu do rozličných sústav. Táto vedomosť je dôležitá z hľadiska analýzy pôsobenia harmonicky skresleného signálu na spotrebiče a prvky elektrickej sústavy. Súvislosť medzi rádom harmonických a príslušnou symetrickou sústavou je uvedená v tabuľke č. 6-2.

Tab. 6-2 Prispievanie harmonických komponentov do symetrických komponentov

Zložka	Rád harmonickej zložky	
súsledná zložka	$3n + 1$	1,7,13,...
spätná zložka	$3n - 1$	5,11,17,...
netočivá zložka	$3n$	3,9,15,21,...

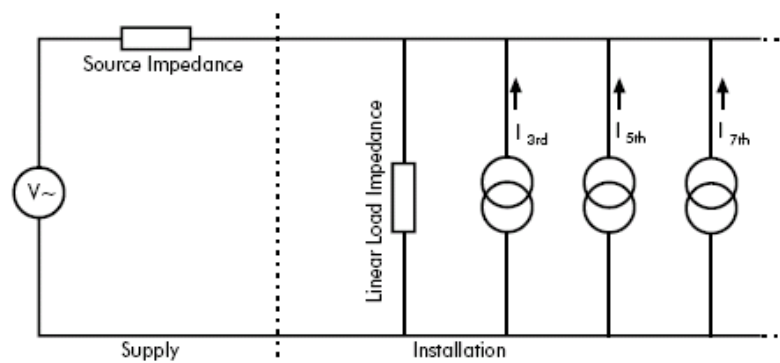
### 6.2.2 Zdroje harmonického skreslenia

Zdroje harmonického skreslenia môžu byť rozdelené všeobecne do troch skupín.

1. Samotná výroba elektrickej energie nesie so sebou určitý stupeň nedokonalosti. Svorkové napätie generátora je čiastočne skreslené. Príčinou je geometria synchronného generátora. Avšak tento príspevok k celkovému harmonickému skresleniu v sústave sa vďaka malej intenzite právom zanedbáva.
2. Druhým zdrojom skreslenia sú prenosové sústavy. V prípade striedavej napájacej siete je typickým nelineárnym prvkom silový transformátor pracujúci za saturačným bodom. Tento problém by mal byť riešený správnou projekciou prenosovej sústavy a monitorovaním tokov energie. Vážnejším prispievateľom v oblasti prenosu elektrickej energie je jednosmerná prenosová sústava HVDC, kde zmeny ac – dc, dc – ac sú realizované pomocou výkonových prvkov, ktoré sú pretekané nesínusovým prúdom a následne spôsobujú skreslenie napätia.
3. Tretím a majoritným pôvodcom harmonického skreslenia je stále rastúci počet nelineárnych elektrických spotrebičov. Nelineárna záťaž môže byť rozdelená do dvoch skupín:
  - a. Jednofázové spotrebiče, ktoré zahŕňajú
    - i. Spínané napájacie zdroje,
    - ii. Elektronické predradníky kompaktných svietidiel
    - iii. Malé zdroje neprerušiteľného napájania (UPS)
  - b. Trojfázové spotrebiče
    - i. Elektronicky regulované pohony
    - ii. Zdroje neprerušiteľného napájania (UPS)

lit. zdroj [14]

Nelineárna záťaž môže byť vyjadrená nasledovnou náhradnou schémou:



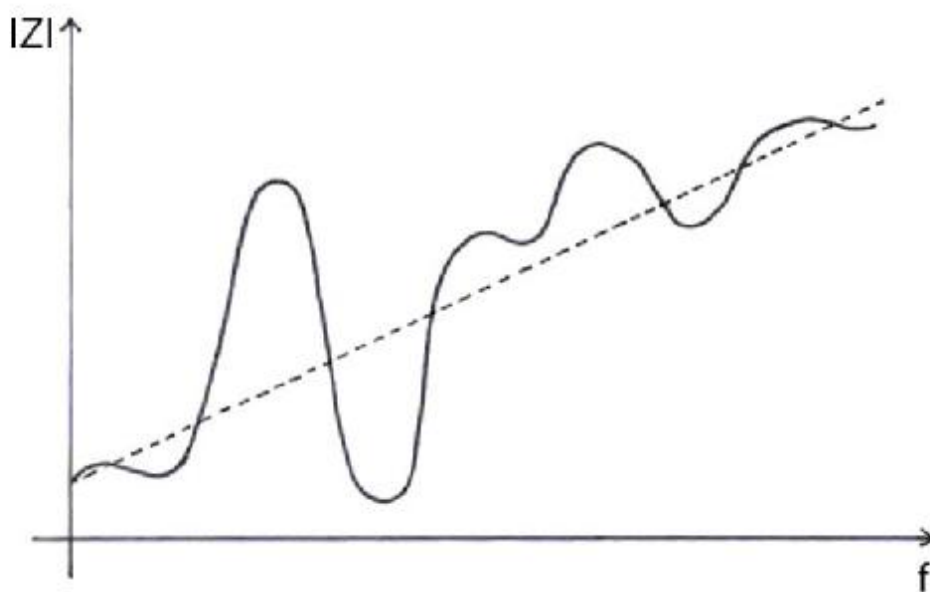
Obr. 6-4: Náhradná schéma nelineárnej záťaže pripojenej do sústavy [14]

Ako predošlá náhradná schéma naznačuje, harmonické prúdy smerujú od zdroja harmonického skreslenia, t.j. záťaže, k zdroju elektrickej energie. Ich šírením pozdĺž siete vznikajú neharmonické úbytky napätia na prenosových cestách. Toto vedie k skresleniu napätia

v sieti, ktoré je vnímané širšou skupinou konzumentov. Napät'ové skreslenie narastá proporcionálne s impedanciou napájacej siete v bode spoločného napájania (pcc) a s veľkosťou harmonických prúdov pretekajúcich cez bod uvažovania napät'ového skreslenia.

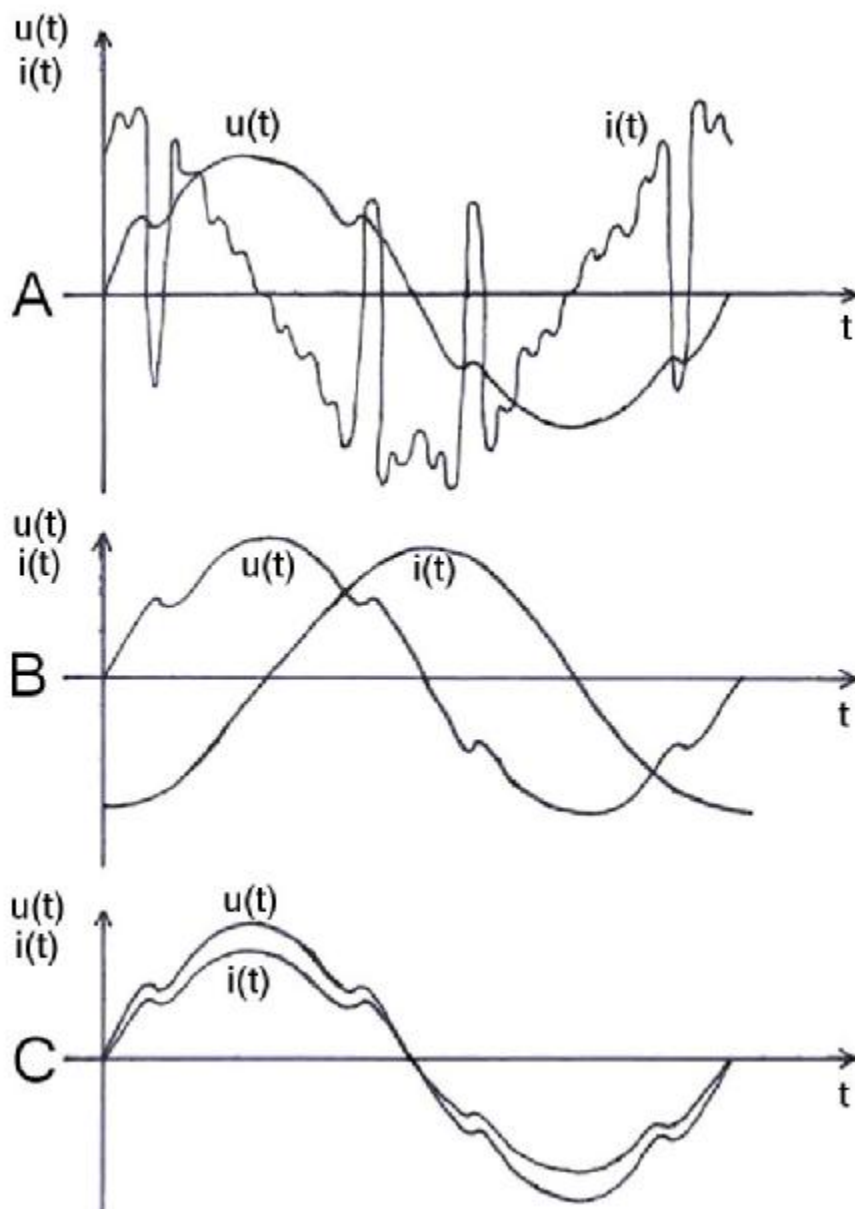
Preto sa zaviedli štandardy (ČSN EN 61000-3-2: Meze pro emise harmonických proudů spotřebičů, které mají vstupní fázový proud < 16A), ktoré predpisujú maximálne emisie (hodnoty harmonického prúdu) daného elektrického zariadenia s ohľadom na ochranu ostatných spotrebiteľov voči vplyvu deformovaného napätia.

Impedancia siete v bode spoločného napájania (pcc) má obecné induktívny charakter, avšak závisí na frekvencii. Vyjadruje sa impedančnou závislosťou (obr. 6-5). Ak by bola sieť zložená len z R, L prvkov, impedančnú charakteristiku by predstavovala vyznačená čiarkovaná čiara. Vzájomné pôsobenie induktívnych a kapacitných elementov však vedie k rezonančnému chovaniu sústavy. Sériová a paralelná rezonancia zosilňujú harmonické skreslenie a preto sa zaraďujú medzi ich zdroje. Rezonančné body sú charakteristické náhlym zvýšením, resp. znížením impedancie systému pre určitú frekvenciu. Body rezonančnej frekvencie sú badateľné aj na nasledujúcom obrázku. Hlbší rozbor rezonančných mechanizmov je pojednávaný v neskoršej časti práce.



Obr. 6-5: Možná impedančná charakteristika siete v bode spoločného napájania

V tejto stati boli nelineárne záťaže predstavené ako hlavný zdroj harmonického skreslenia prúdu a následne napätia. Je však veľmi dôležité dodať, že aj lineárna záťaž môže spôsobiť skreslenie prúdu v prípade, že napätie na svorkách tohto spotrebiča je už deformované. Nasledovné obrázky poukazujú na tento fakt pre prípady troch charakteristických spotrebičov ktorými sú induktor, kondenzátor, rezistor.



Obr. 6-6: Deformácia prúdu na lineárnom spotrebiči vplyvom skresleného napätia pre a) kondenzátor, b) induktor, c) rezistor [13]

Priebeh prúdu na pozadí napät'ovej deformácie tkvie vo funkčných závislostiach prúdu na napätí pre jednotlivé elektrické prvky.

« Kondenzátor

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (6.5)$$

« Induktor

$$i(t) = \frac{1}{L} \cdot \int u(t) dt \quad (6.6)$$

« Rezistor

$$i(t) = R \cdot u(t) \quad (6.7)$$

Je evidentné, že najcitlivejším článkom je kondenzátor, ktorý reaguje na skokové zmeny v priebehu napätia prúdovými zákmitmi. Tie plynú z vysokej hodnoty derivácie vo vzťahu (6.5).

V nasledujúcej kapitole dostáva priestor analýza účinkov harmonického skreslenia prúdu a napätia na elektrické zariadenia.

### 6.2.3 Dôsledky šírenia harmonických prúdov

V tejto kapitole budú spomenuté nasledovné problémy vyplývajúce z šírenia harmonických prúdov v sieti:

- Prídavné Joulllove straty vo vedení
- Preťažovanie stredného vodiča
- Prídavné zaťažovanie transformátorov
- Preťažovanie kompenzačných kondenzátorov ( téma je venovaná individuálna stať v neskoršej časti práce )

#### Prídavné Joulllove straty

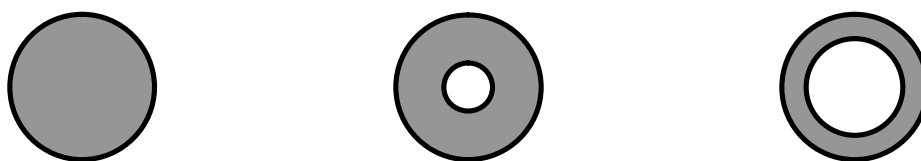
Na úvod je dôležité poznamenať, že len prvá harmonická zložka prúdu sa podieľa na vykonávaní práce. To je za predpokladu, že svorkové napätie na spotrebiči je neskreslené.

Užitočné je porovnanie dvoch prúdov (skresleného a neskresleného), ktoré prenášajú rovnaký činný výkon. Obidva prúdy musia mať rovnakú základnú harmonickú zložku, ale skreslený prúd navyše obsahuje aj harmonické komponenty, ktoré zvyšujú efektívnu hodnotu tohto prúdu.

Táto nadbytková časť vedie k zvýšeným Joulllovým stratám prenosového systému.

Iné súvislosti, ktoré zvyšujú Joulllove straty sú nasledovné. Harmonicky skreslený prúd s rovnakou efektívnou hodnotou ako neskreslený prúd produkuje vo vodiči s Ohmicou impedanciou viac strát. Toto je zaujímavý jav, pretože podľa základov elektrotechniky, rezistivita vedenia nezávisí na frekvencii. Avšak zhruba od harmonického rádu  $h = 7$  začína rezistencia závisieť na frekvencii. Zodpovednou príčinou za vyšší elektrický odpor je Skin efekt. Ten sa zanedbáva pri základných frekvenciách, avšak projektanti ho musia uvážiť na miestach kde je šírenie harmonických prúdov predpovedané ako veľké. Ako možné riešenie sa ponúka posilnenie vodiča paralelnou prúdovou cestou. Vyšší prierez vodičov nemusí zaistiť očakávané zlepšenie vďaka umiestneniu nábojov na povrchu vedení.

Demonštratívny je v tomto smere obr. 6-7, kde sivá plocha značí vodivostné pásmo. Tab. 6-3 poukazuje na závislosť šírky vedenia na frekvencii pre medené vodiče.



Obr. 6-7: Vodivostné pásmo medeného vodiča pre a) vedenie DC prúdu, b) vedenie AC prúdu, c) vedenie AC prúdu s vysokofrekvenčnými zložkami



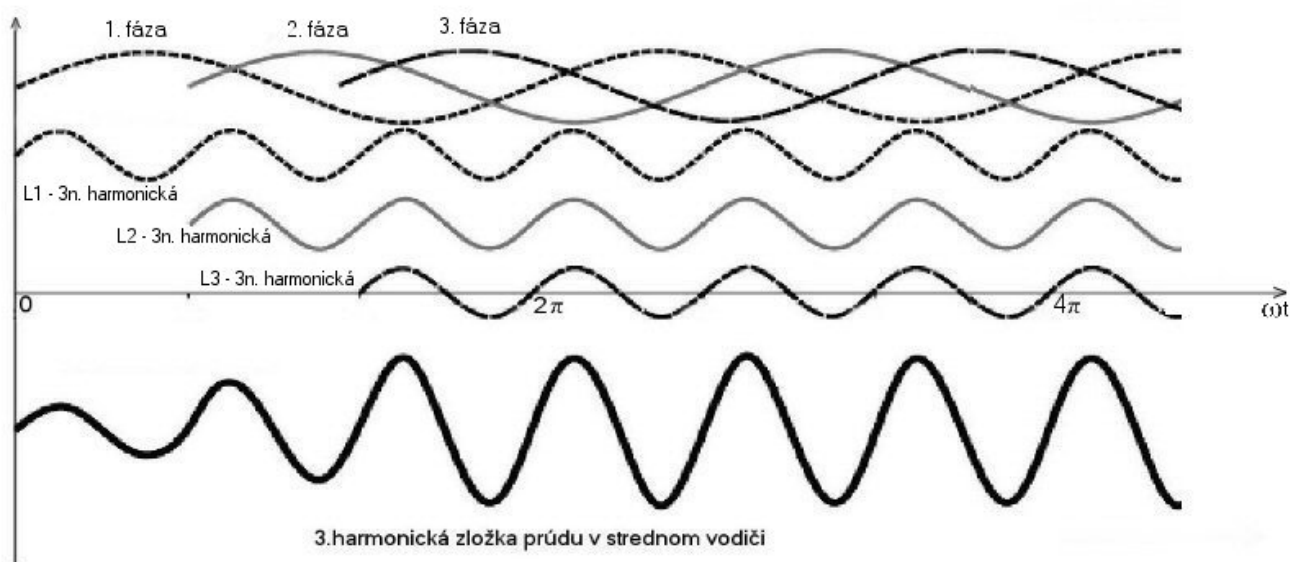
Tab. 6-3 Šírka vodivostného pásma medeného vodiča v závislosti na frekvencii

Frekvencia	60 Hz	10kHz	100kHz	1MHz	10Mhz
Šírka pásma	8,47mm	0,66mm	0,21mm	66 $\mu$ m	21 $\mu$ m

### Pret'azovanie stredného vodiča

V prípade symmetrickej štvorvodičovej trojfázovej sústavy sa prúd tečúci stredným vodičom rovná nule. Ak je sústava nevyvážená, súčet prúdov v strednom vodiči je nenulový. Hodnota nevyváženosti sústavy je obyčajne rešpektovateľná a preto boli prierezy stredných vodičov projektované s nižším prierezom oproti fázovým vodičom. Fenomén silného harmonického skreslenia prúdov však často vedie k pret'azovaniu stredných vodičov. Napriek rovnomernému rozdeľovaniu výkonov medzi jednotlivé fázy môže nastať stav, kedy je stredný vodič pretekaný prúdom. Harmonické komponenty rádu  $3n$  jednotlivých fáz sa aritmeticky sčítajú v strednom vodiči (podľa obr. 6-8). Prúdy v strednom vodiči takýmto spôsobom môžu dosiahnuť maximálne 1,72 násobok fázového prúdu. Podľa  $\Delta P = RI^2$  sú potom vystavené trojnásobnému tepelnému namáhaniu oproti fázovým vodičom. Špecifickými miestami, kde nebezpečie čaká na svoju chvíľu, sú administratívne budovy. Obzvlášť tie, kde bola elektrifikácia realizovaná v minulosti bez uvažovania rastúceho počtu počítačov a iných elektronických prostriedkov ktoré spôsobujú harmonické skreslenie prúdu rádmi  $3n$ .

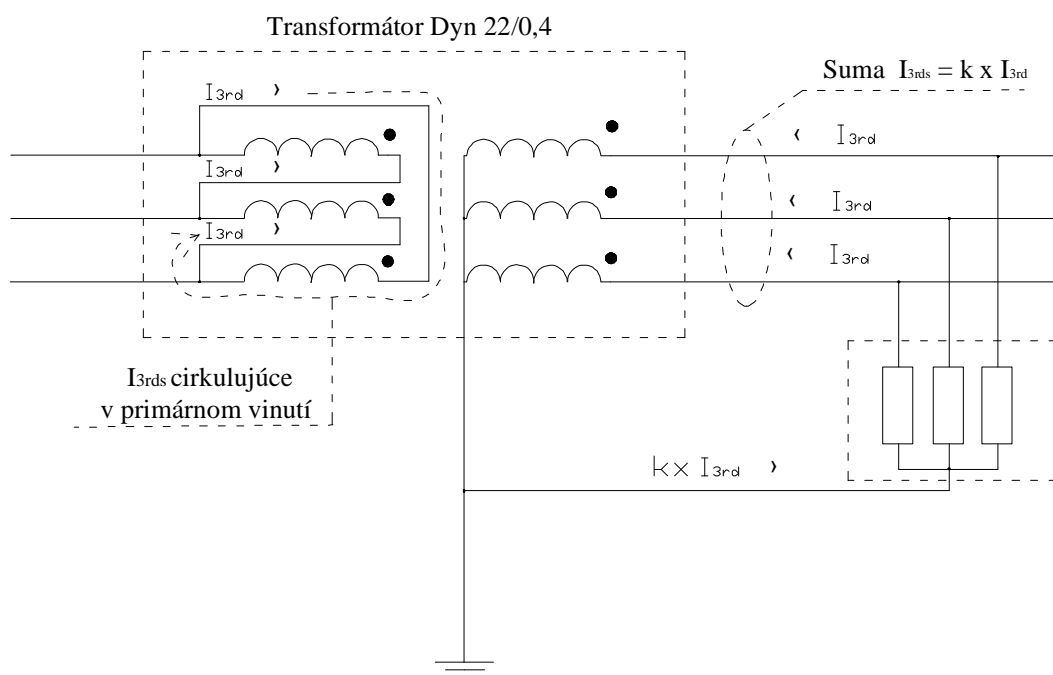
V prípade, že situácia nedovoľuje zvyšovať prierez stredného vodiča, je potrebné odľahčiť zaťaženie vodičov podľa CDF (cable derating factor).

Obr. 6-8: Sumácia harmonických prúdov rádu  $h=3n$  v strednom vodiči [14]

## Prídavné zaťaženie transformátorov

Transformátory sú v harmonicky zarušenom prostredí preťažované hlavne kvôli zvýšeným vírivým prúdom. Vírivé prúdy sú kvadraticky závislé na frekvencii a teda na ráde harmonických. Transformátory, ktoré pracujú v silne deformovanom prostredí, musia byť odľahčené podľa TDF (transformer derating factor).

Druhá príčina, ktorá spôsobuje prídavné zaťažovanie transformátorov súvisí s cirkuláciou  $3n$  harmonických zložiek na primárnej strane distribučného D/y transformátora.



Obr. 6-9: Cirkulácia harmonických prúdov rádu  $h=3n$  v primárnom vinutí Dy transformátora

Toto je užitočná vlastnosť, ktorá zabráni prúdeniu harmonického prúdu rádu  $h=3n$  do vedení VN (uvedené platí pre napájanie symetrickej záťaže). Sekundárnym dôsledkom je prídavné zaťažovanie primárneho vinutia transformátora, ktoré sa musí zohľadniť pri dimenzovaní transformátora.

### 6.2.4 Dôsledok deformácie napätia

V tejto kapitole sú pojednávané nasledovné problémy vyplývajúce z deformácie sieťového napätia:

- Preťažovanie kompenzačných kondenzátorov ( téma je venovaná individuálna stat' v neskoršej časti práce )
- Prídavné zaťažovanie motorov
- Interferencia s telekomunikačným vedením
- Disfunkcia elektronických zariadení

### Prídavné zaťažovanie motorov

Za normálnych podmienok je asynchrónny motor napájaný symetrickým trojfázovým napätím, ktoré pri rozklade na symetrické komponenty obsahuje len súslednú zložku. V prípade napájania deformovaným napätím jednotlivé harmonické komponenty prispievajú aj do spätnej sústavy, ako aj do netočivej sústavy. Konkrétna súvislosť je uvedená v *tab. 6-2*.

Spätaná napäťová sústava vytvára točivé magnetické pole v statore so záporným smerom otáčania. Netočivá napäťová sústava sa podieľa na vzniku statického magnetického pola v statore. Obidve spomenuté magnetické polia svojim charakterom brzdia točivý moment asynchrónneho motora. Tým zvyšujú jeho tepelné namáhanie a následne znižujú životnosť.

Interakcia jednotlivých magnetických polí znehodnocuje presnosť práce motora na miestach, kde sa to vyžaduje (napr. obrábanie kovov). Príčinou je pulzujúce točivé magnetické pole v statore.

### Interferencia s telekomunikačným vedením

Obzvlášť na miestach, kde harmonické skreslenie napätia obsahuje vysokofrekvenčné zložky, sa môže objaviť rušenie telekomunikačného vedenia silovým káblom.

### Disfunkcia elektronických zariadení

Mnoho elektronických zariadení je ovládaných informáciou o priechode okamžitej hodnoty napájacieho napätia nulou. Iným prípadom v trojfázovej sústave je komutačný bod, v ktorom jeden spínací prvok odovzdáva vodivostný stav druhému. Správna funkčnosť elektronických prístrojov je závislá na presnosti týchto charakteristických bodov. V prípade harmonického skreslenia napätia dochádza k posunom týchto hraničných bodov a môže dôjsť k zlyhaniu celého systému.

V posledných dvoch podkapitolách boli zhrnuté najvýraznejšie účinky harmonického skreslenia prúdu a napätia. Je potrebné dodať, že existuje viacero ďalších priamych aj nepriamych dopadov na elektromagnetické okolie. Sú to napríklad:

- ú Rušenie spínacích prvkov
- ú Zosilnenie magnetického poľa v okolí vedenia
- ú Rozladenie zhášacej cievky v kompenzovanej sieti
- ú Chyby meracích prístrojov

Z hľadiska tematického zaradenia však nie sú podstatné pre túto prácu. Preto sa pozornosť ďalej upriamuje na kompenzačné kondenzátory a ich interakciu s nelineárnym elektromagnetickým prostredím.

### 6.3 Kompenzačné jednotky v harmonicky skreslenom prostredí

Kondenzátory sú možno najviac postihnuté obeť harmonického skreslenia napätia a prúdu. Existuje niekoľko mechanizmov, ktoré sa podieľajú na ich preťažovaní, a následne znižovaní životnosti.

#### 6.3.1 Zvýšené dielektrické namáhanie

Prítomnosť harmonického skreslenia napätia zvyšuje dielektrické namáhanie kondenzátora. Celkové straty sa dajú vyhodnotiť ako:

$$\Delta P_C = \sum_{h=1}^{\infty} C \cdot (\tan d_h) \cdot w_h \cdot U_h^2 \quad (6.8)$$

Kde:  $\tan \delta$  predstavuje tangentu stratového uhlu kondenzátora. Ten udáva pomer medzi sériovým predradným odporom a kapacitnou reaktanciou kondenzátora pri danej frekvencii (6.9).

$$\tan d = \frac{R}{\frac{1}{w_h \cdot C}} = R \cdot C \cdot w_h \quad (6.9)$$

Pri dosadení vzťahu (6.9) do (6.8) sa postupne dospeje do nasledovného tvaru:

$$\Delta P_C = \sum_{h=1}^{\infty} C \cdot (\tan d_h) \cdot w_h \cdot U_h^2 = R \cdot \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{U_h^2}{\frac{1}{C \cdot w_h}} \right) = R \cdot \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{U_h^2}{X_{Ch}} \right) = R \cdot C \cdot 2p \cdot f_1 \sum_{h=1}^{\infty} (h \cdot U_h^2) \quad (6.10)$$

Výsledný vzťah signalizuje, že celkové straty sa zvýšia o časť, ktorú predstavujú vyššie harmonické zložky. Váha harmonických zložiek napätia vyšších frekvencií je vzťahu (6.10) zvýraznená pomocou násobenia rádom harmonickej zložky. Dôvod spočíva vo frekvenčnej závislosti kapacitnej reaktancie kondenzátora  $X_C(f) = k / f$ . Z toho vyplývajú má kondenzátor nízku impedanciu pre harmonické napätia vyšších rádov. Znamená to, že harmonické napätia vyšších rádov budú vyvolávať intenzívnejší harmonický prúd príslušného rádu vďaka nižšej impedancii na vyšších frekvenciách.

Pri uvážení harmonických napätí rôznych rádov s rovnakými amplitúdami je potom zrejmé, že skreslené napätie vyššieho rádu vyvolá vyšší prúd a vyššie straty. Toto potvrdzuje aj rozvinutie Ohmovho zákona pre vyššie harmonické:

$$I_h = \frac{U_h}{X_C} = \frac{U_h}{\frac{1}{2 \cdot p \cdot f_1 \cdot h \cdot C}} = \text{const} \cdot U_h \cdot h \quad (6.11)$$

Uvedená súvislosť sa vyjadruje pomocou váženého celkového harmonického skreslenia napätia (6.12).

$$THD_{U(V)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (h \cdot U_h^2)}}{U_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad [2] \quad (6.12)$$

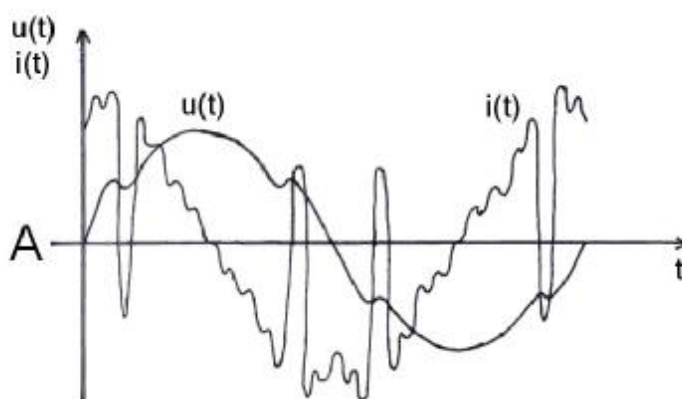
Vzťah (6.12) proporcionálne vyjadruje celkový prúd kondenzátorom a teda aj celkové straty, ktoré pri určitom limite prerastú do preťaženia a skrátenia životnosti. Napríklad  $THD_{U(V)} = 130\%$  zodpovedá 1,3násobnému prúdovému preťaženiu.

Mechanizmus poškodzovania kondenzátorov harmonicky skresleným napätím sa dá zhrnúť nasledovne. Jednotlivé harmonické zložky napätia vyústia do celkového zvýšeného prúdu, ktorý je spätý s váženým THDu. Celkový prúd pretekajúci kondenzátorom spôsobí tepelné namáhanie kondenzátora. Výsledkom môže byť znehodnotenie kondenzátora v krátkom čase. Straty sú technologicky ovplyvniteľné pomocou stratového uhlu  $\tan \delta$ .

Je dôležité rozlíšiť harmonické skreslenie prúdu a napätia pri uvažovaní efektu na kompenzačnú jednotku. V kapitole, kde sa predstavili účinky harmonického skreslenia, bolo na vrub napätového aj prúdového skreslenia pripísané poškodzovanie kondenzátorov. Nie sú však úplne na rovnakej úrovni. Prúd kondenzátorom je určený napätím, na ktoré je pripojené. Preto sa pre hodnotenie prídavného preťaženia harmonickými prúdmi zaviedla veličina vážené celkové harmonické skreslenie napätia. Harmonický prúd vystupuje v mechanizme poškodzovania kondenzátorov ako pôvodca napätovej deformácie. Prúd emitovaný nelineárnymi spotrebičmi však nie je kvantifikovateľne vzťahovaný k prúdu kondenzátorom. Vytvára skreslenie napätia na vedení, ktoré je možné uvažovať ako priamy zdroj negatívneho vplyvu na kondenzátory.

### 6.3.2 Prúdové zákmity vplyvom deformácie napätia

Ďalší mechanizmus preťažovania kondenzátorov je založený na vyššej efektívnej hodnote prúdu vďaka prúdovým špičkám, ku ktorým dochádza kvôli deformovanému priebehu napätia. Prúd kondenzátorom je úmerný časovej derivácii napätia podľa vzťahu (6.5). Najmä skoková zmena v priebehu napätia vedie k vysokým prúdovým zákmitom, ktoré ústia do zvýšenej efektívnej hodnoty a do možného preťaženia kondenzátora. Typický priebeh je zobrazený na obr. 6-10.



Obr. 6-10: Prúdové zákmity prúdu kondenzátorom ako dôsledok deformácie napätia.

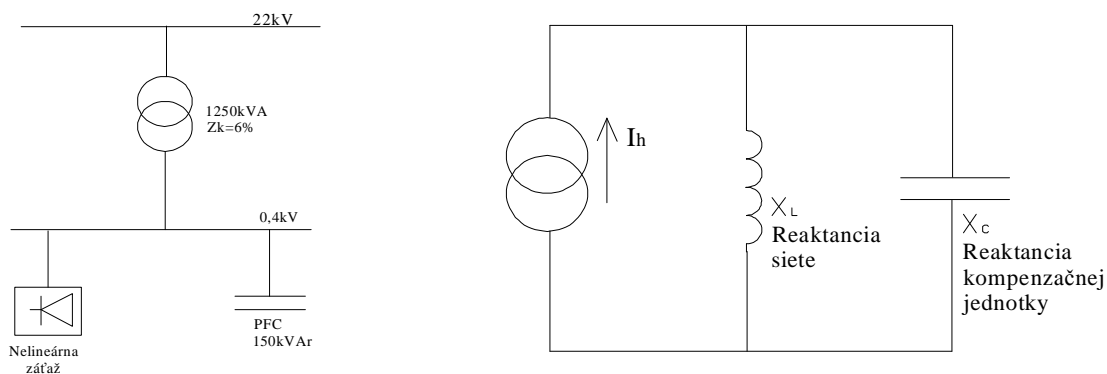
### 6.3.3 Rezonancia kondenzátorov so sieťovými prvkami

Ešte vážnejším problémom, kvôli ktorému sa kondenzátory dostali aj na listinu pôvodcov harmonického skreslenia, sú ich rezonančné vlastnosti. K rezonančným javom dochádza vzájomnou interakciou kondenzátorov s elektrickou sústavou, ktorá je obecnou nositeľom induktívnej reaktancie. Tieto javy sú z elektrotechnického hľadiska veľmi zaujímavé a potvrdzujú pravidlo, že skreslenie elektrickej veličiny môže byť intenzívnejšie ďaleko od miesta pôvodu. Všeobecne rozoznávame rezonanciu na paralelnú a sériovú. Vďaka rozsahu siete však nie je jednoduché potvrdiť konkrétne prvky spôsobujúce rezonanciu.

V dôsledku nelineárnej záťaže dochádza k harmonickému skresleniu prúdu, čo vedie k vzniku deformovaného napätia. Je zrejmé, že sa jedná o prepojené javy, avšak pre analýzu procesu paralelnej a sériovej rezonancie je podstatné si zadať typ skreslenia, ktorý bezprostredne ovplyvňuje daný rezonančný jav. Pre hodnotenie paralelnej rezonancie sa používajú náhradné prúdové zdroje (ako na obr. 6-4). Naopak, rozbor sériovej rezonancie bude prevedený pri predpoklade napäťových zdrojov. Popis rezonančných javov sa opiera o Ohmov zákon upravený pre harmonické zložky.

#### 6.3.3.1 Paralelná rezonancia

Typickou sieťovou konfiguráciou, ktorá umožňuje paralelnú rezonanciu za určitých podmienok, je nasledovná schéma:



Obr. 6-11: Konfigurácia siete umožňujúca paralelnú rezonanciu a jej náhradná schéma

Proces sprevádzajúci vykreslené schémy je nasledovný. Pre nelineárnu záťaž – zdroj harmonického skreslenia prúdu, sú induktívna reaktancia transformátora a kompenzačný kondenzátor paralelne radené. Táto paralelná kombinácia dosahuje za určitých podmienok veľmi vysokú impedanciu. Impedancia pri paralelnom radení sa počíta podľa (6.14).

$$Z = \frac{j \cdot \omega \cdot L \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{j \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \quad (6.14)$$

Celý vzťah limituje k nekonečnej hodnote, ak sa menovateľ blíži k nule. Ak položíme menovateľ vzťahu nule, pre dané hodnoty L,C môžeme vypočítať frekvenciu pri ktorej celý zlomok limituje k nekonečnu. Táto frekvencia sa nazýva rezonančnou frekvenciou a vyjadruje sa pomocou Thompsonovho vzťahu (6.15).

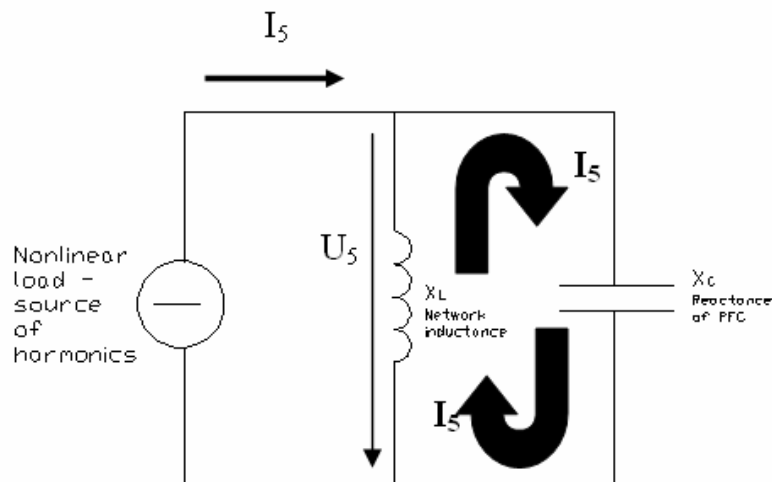
$$f_{res} = \frac{1}{2.p.\sqrt{L.C}} \quad (6.15)$$

Príklad paralelnej rezonancie môže byť nasledovný. Konfigurácia siete zodpovedá schéme na obr. 6-11 a rezonančná frekvencia pre paralelnú kombináciu kondenzátora a sieťovej reaktancie ( reprezentovaná hlavne reaktanciou transformátora ) sa pomocou (6.15) určila napr. na 250Hz. Prítomný nelineárny spotrebič produkuje veľké množstvo harmonickej zložky prúdu s rádom 5.

V tomto prípade je impedancia vnímaná zdrojom piatych harmonickej zložiek prúdu ako vysoká. Potom podľa vzťahu (6.16) narastá harmonické napätie  $U_5$  na paralelnej kombinácii L-C taktiež k veľmi vysokým hodnotám.

$$U_h(\uparrow) = I_h(const) \cdot Z_h(\uparrow) \quad (6.16)$$

Následne piata harmonická zložka napätia na týchto prvkoch vyvolá vysokú harmonickú zložku prúdu rádu 5 tečúcu medzi  $X_L$  a  $X_C$ . Toto môže byť demonštrované nasledovným obrázkom.



Obr. 6-12: Priebeh paralelnej rezonancie

Obr. 6-12 poukazuje na vysokú hodnotu piatej harmonickej zložky prúdu medzi kondenzátorom a indukčnosťou, ktorá je predstavovaná sieťou. Tento prúd je omnoho vyšší ako ten, prúdiaci z nelineárnej záťaže.

Typická impedančná charakteristika s vyznačeným bodom paralelnej rezonancie je na obr. 6-13.

Určenie bodu paralelnej rezonancie môže (okrem 6.15) prebiehať niekoľkými postupmi:

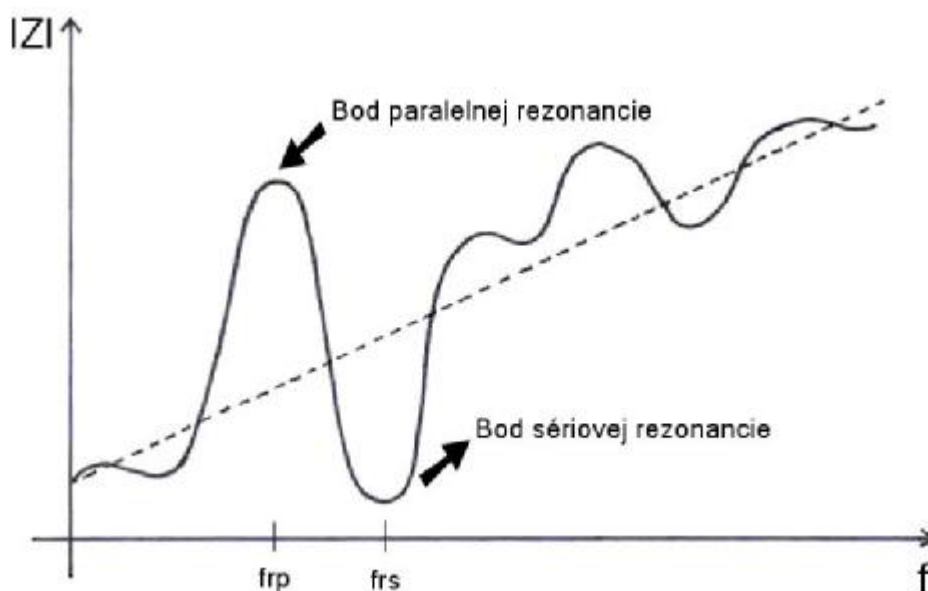
a) Výpočtom podľa vzťahu

$$f_p = f_n \cdot \sqrt{\frac{S_s}{Q_c}} \quad (6.17)$$

kde  $f_n$  predstavuje nominálnu frekvenciu,  $S_s$  je skratový výkon siete (VAr),  $Q_c$  je výkon kompenzačnej jednotky (Var). Takéto vyhodnocovanie môže byť dostatočné pri stave, keď je pripojený kondenzátor s rovnakou hodnotou výkonu a skratový výkon siete v mieste pripojenia kompenzácie je nemenný. Je jasné, že daný status neprislúcha stupňovitej kompenzácii. Výpočtovú metódu prevyšuje z hľadiska presnosti a komplexnosti impedančnej charakteristiky meranie.

b) Existuje niekoľko meracích metód, väčšina z nich je založená na Ohmovej metóde. Impedancia sa určuje z harmonického napätia a z pretekajúceho prúdu. Meranie je možné uskutočniť invazívne alebo neinvazívne. Pri invazívnej metóde sa emituje do meraného uzlu testovací prúd danej frekvencie a odmeria sa napäťová odozva systému. Podľa Ohmovho zákona sa vyhodnotí impedancia siete v meranom bode. Neinvazívna metóda je založená na meraní odozvy systému na zmenu záťaže. Táto metóda môže byť prevedená ako aktívna alebo pasívna. Pri realizácii aktívnej neinvazívnej metódy sa prepína presne definovaná záťaž v súlade s meracím reťazcom. Pasívna metóda podlieha neprispôsobeným zmenám záťaže.

c) Impedančná charakteristika sa môže stanoviť modelovaním pri využití SW nástroja (P Spice). Je potrebné zakomponovať do modelovanej schémy parametre v čo najväčšom rozsahu, aby sa zabezpečila maximálna presnosť výsledkov.



Obr. 6-13: Impedančná charakteristika s vyznačenými rezonančnými bodmi

Vďaka zložitosti sústavy je náročné predpovedať interakciu určitých dvoch elementov. Rezonancie môžu prebiehať na ľubovoľných prvkoch, preto sú posledné dve metódy komplexnejšie s ohľadom na vyhodnotenie impedančnej charakteristiky v celom frekvenčnom rozsahu.



### 6.3.3.2 Sériová rezonancia

Obr. 6-14 predstavuje typickú sieťovú konfiguráciu, ktorá môže viesť k sériovej rezonancii.

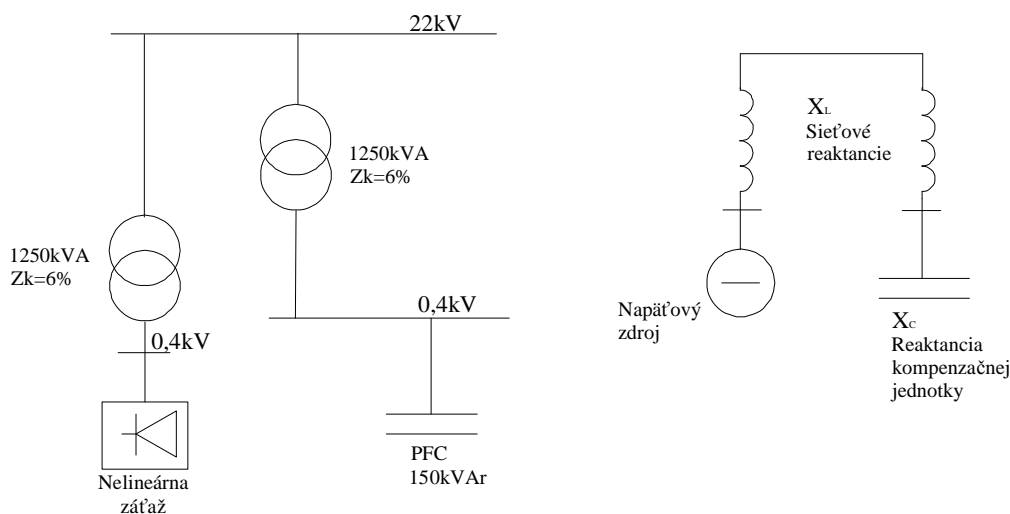
Celková impedancia vnímaná zdrojom harmonického skreslenia - nelineárnou záťažou (modelovanou ako napät'ový zdroj jednotlivých harmonických zložiek) môže byť vyjadrená podľa (6.18), kde  $L$  predstavuje indukčnosť oboch transformátorov.

$$Z = j.\omega.L + \frac{1}{j.\omega.C} \quad (6.18)$$

Opäť je rezonančná frekvencia ekvivalentnej schémy vyjadriteľná pomocou (6.15). Ak je rezonančná frekvencia sériovej kombinácie L-C na úrovni napr. 350Hz, potom zdroj harmonických (ideálny napät'ový zdroj napr.  $h=7$ ) spôsobuje jav, ktorý je demonštrovaný pomocou (6.19).

$$U_h(const) = \Downarrow Z_h \cdot I_h \Uparrow \quad (6.19)$$

Keďže je harmonické napätie rádu sedem konštantné, siedma harmonická zložka prúdu musí zákonite dramaticky narásť kvôli razantnému poklesu hodnoty impedancie. Veľká hodnota siedmej harmonickej zložky prúdu bude ovplyvňovať svoje elektromagnetické okolie, najmä však životnosť kompenzačného kondenzátora.



Obr. 6-14: Sieťová konfigurácia s pravdepodobnosťou sériovej rezonancie, ekvivalentný obvod.

Impedančná charakteristika s bodom sériovej rezonancie je vyznačená na obr. 6-13. Pri rezonančnej frekvencii pre sériovú rezonanciu prudko klesá hodnota impedancie sériovej kombinácie L-C.

K rezonančnej frekvencii sériovej rezonancie môžeme dospieť aj nasledovným vzťahom.

$$f_s = f_n \cdot \sqrt{\left( \frac{S_t}{Q_C \cdot e_k} - \frac{P_{odb}^2}{Q_C^2} \right)} \quad [16] \quad (6.20)$$

kde  $S_t$  predstavuje výkon transformátora,  $e_k$  je napätie nakrátko transformátora,  $P_{odb}$  je činný výkon odberu, ktorý sa kompenzuje,  $Q_C$  je jalový výkon kompenzačnej jednotky.

Ostatné techniky zistenia bodu sériovej rezonancie podliehajú spôsobom analýzy impedančnej charakteristiky – meraním, sw modelovaním.

To bol stručný popis mechanizmov vplyvu harmonického skreslenia na kompenzačnú jednotku. Pri ich realizácii je nutné kvantifikovať mieru, druh a príčinu harmonického skreslenia. Vyhodnoteniu týchto údajov s návaznosťou na riešenie nepriaznivého stavu sa venuje kapitola 7.

V závere hodnotenia kondenzátorov v harmonicky skreslenom prostredí je možné podotknúť dvojitý uhol pohľadu, ktorým je možné hľadiť na problematiku. Ten prvý vníma kondenzátory ako citlivé elektrické prvky, ktoré sú poškodzované vplyvom harmonického skreslenia. Druhá možnosť nazerania ich však neúprosne pasuje za pôvodcov deformácie priebehu elektrických veličín. Pravdou je, že kondenzátory sú sekundárnymi pôvodcami skreslenia, keďže majú tendenciu zosilňovať skreslenie do takej intenzity, ktorá ich môže znefunkčniť.

## 6.4 Výkony v nelineárnom elektromagnetickom prostredí

Deformácia elektrických veličín so sebou priniesla okrem iných opatrení aj potrebu prehodnotiť definície elektrických výkonov. Klasická Budeanuova teória výkonu je postavená na nasledovnom základe.

### 6.4.1 Budeanuova teória výkonu

Prenos energie s harmonickým skreslením, podobne ako prenos jalových výkonov, spôsobuje menšiu efektivitu pri transfere elektrickej energie. Úroveň strát vplyvom harmonického skreslenia sa vyjadruje veličinou deformačný výkon  $D$  (VA). Spôsob, akým je definovaný deformačný výkon prostredníctvom Budeanua, je predstavený v tejto práci pre napájanie nelineárnej záťaže sínusovým napätím.

#### ú Výkony v jednofázovom obvode pri $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ a nelineárnej záťaži

Pri predpoklade nesínusového periodického odoberaného prúdu, je možné prúd rozložiť do harmonických zložiek podľa vzťahu (6.1). Efektívna hodnota odoberaného prúdu je potom nasledovná:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot i^2(t) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2 + \dots I_H^2} = \sqrt{\sum_{h=0}^H I_h^2} \quad (6.21)$$

Daný príklad uvažuje neskreslené napájacie napätie reprezentované základnou harmonickou. Potom sa okamžitý výkon dá vyjadriť nasledovne:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = u_1(t) \cdot \sum_{h=0}^H i_h(t) = u_1(t) \cdot i_1(t) + u_1(t) \cdot \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H i_h(t) \quad (6.22)$$

Podľa analýzy vzťahu (5.6) v tejto práci sa dá povedať, že prvá časť (6.22) vedie na dva elementy (činný a jalový výkon). Druhá časť reprezentuje deformačný výkon a je daná súčinom napätia a vyšších harmonických zložiek prúdu. Deformačný výkon nekoná žiadnu prácu (podobne ako jalový výkon) a jeho stredná hodnota za jednu periódu je rovná nule.

Po vyjadrení jednotlivých výkonových elementov dostávame nasledovné vzťahy:

### § Činný výkon

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[ u_1(t) \cdot \sum_{h=0}^H i_h(t) \right] dt = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos j_1 \quad (6.23)$$

Zo vzťahu (6.23) je vidieť, že na činnom výkone sa môžu podieľať len elektrické veličiny s rovnakými frekvenciami. Ak by bola prítomná tretia harmonická napätia a prúdu, vzájomný súčin by takisto prispieval k činnému a jalovému výkonu.

§ **Jalový výkon** sa riadi vzťahom (5.10). Taktiež ho vytvára súčin prúdu a napätia rovnakých frekvencií pri ich fázovom posuve.

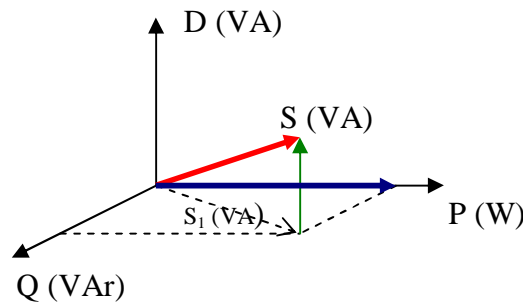
### § Zdanlivý výkon

$$S = U \cdot I = U_1 \cdot I = U_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=0}^H I_h^2} = \sqrt{U_1^2 \sum_{h=0}^H I_h^2} = \sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 + U_1^2 \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H I_h^2} \quad (6.24)$$

Ďalej sa dá (6.24) rozviesť na:

$$S = \sqrt{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos j_1)^2 + (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin j_1)^2 + U_1^2 \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H I_h^2} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (6.25)$$

Vzťah (6.25) vyjadruje výkonové súvislosti. Je možné podotknúť, že v porovnaní s nedeformovaným stavom, pribudla veličina deformačný výkon. Tá reprezentuje zaťažovanie elektrizačnej sústavy pri prítomnosti harmonického skreslenia. Grafické znázornenie je prevedené na Obr. 6-15.



Obr. 6-15: Výkonový tetrahedrón

Je nutné podotknúť, že obrázok nereprezentuje fyzikálnu skutočnosť, vyjadruje len matematickú súvislosť dielčích výkonov, podobne ako súvisiace vzťahy. Na tejto výkonovej schéme, ktorý sa nazýva aj výkonový tetrahedrón, sú znázornené jednotlivé výkony definované

Budeanuom. Modrá šípka reprezentuje ideálny výkonový prenos, v ktorom sa uskutočňuje iba transfer činného výkonu bez jalového a deformačného výkonu. Červená šípka vyjadruje výkon, ktorým je prenosová cesta zaťažovaná pri prenose značného jalového výkonu s prítomnosťou harmonického skreslenia. Zelená šípka vyjadruje samotný deformačný výkon  $D$  pri odbere skresleného prúdu.

Obidva javy ( nevykompenzovaný účinník, harmonické skreslenie ) sa podieľajú na znížení efektivity prenosu, preto je potrebné ich eliminovať. Pri klasickom spôsobe kompenzácie (bez odstránenia harmonického skreslenia) je ovplyvňovaná veličina DPF (displacement power factor), ktorý sa nazýva aj charakter odberu.

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \cos j_1 \quad (6.26)$$

Účinník odberu, ktorý zahŕňa aj vplyv harmonického skreslenia je nasledovný:

$$I = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (6.27)$$

Uvedené vzťahy a výkonový tetrahedrón nie sú aplikovateľné pre všetky stavy. Sú však demonštratívne a poukazujú na potrebu dosiahnuť efektívny stav pre chod ES nielen kompenzáciou účinníka, ale aj potlačením vplyvu harmonického skreslenia.

Konkrétne je Budeanuvu výkonovú teóriu možné aplikovať len pre frekvenčne nezávislé (R), frekvenčne závislé záťaže (L,C) alebo nelineárne záťaže napájané neskresleným napätím. Okrem toho je možné ju použiť pri napájaní ohmickej lineárnej záťaže deformovaným napätím. Pri ostatných stavoch táto teória zlyháva. Vtedy je vhodné použiť pokročilejšie výkonové teórie, ktoré sú založené na rozklade elektrických veličín do ortogonálnych zložiek. [9]

### 6.4.2 Teória okamžitých výkonov p-q

Výkonová teória je založená na transformácii fáz a, b, c trojfázovej sústavy do troch kolmých súradnicových osí  $\alpha\beta 0$ . Výsledkom sú okamžité výkony definované v časovej oblasti. Nie sú kladené žiadne obmedzenia na priebeh napätia alebo prúdu a aplikácia je možná pre trojfázové systémy s/bez neutrálneho vodiča. Teória je platná nielen v rovnovážnom stave, ale taktiež pri analýze prechodných javov. Preto sa s úspechom používa pri riadení napr. linkových kondicionérov.

Clarkeova transformácia prevedie okamžité napätia trojfázovej sústavy na okamžité napätia premietnuté v osiach  $\alpha\beta 0$ . Rovnaký proces sa aplikuje aj na okamžité prúdy (6.28), (6.29).

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Demonštrovanie princípu výkonovej teórie prebehne na analýze trojfázovej trojvodičovej sústavy. V tomto prípade sa nulová zložka nevyskytuje a je možné ju eliminovať aj vo vzťahoch. Po úprave (6.28):

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

Vektory okamžitých hodnôt napätí a prúdov premietnutých v osiach  $\alpha$ ,  $\beta$  sú nasledovné:

$$\bar{e} = u_a + j u_b \quad (6.32)$$

$$\bar{i} = i_a + j i_b \quad (6.33)$$

Vyššie uvedené vektory sú popisované v komplexnej rovine, kde reálna os reprezentuje os  $\alpha$  a imaginárna os je ekvivalentná osi  $\beta$ . Veličiny sú funkciou času.

Základná definícia  $p$ ,  $q$  v teórii nepretržitých výkonov vychádza z nasledovného vzťahu:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a & u_b \\ -u_b & u_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

Pre lepšiu prehľadnosť fyzikálneho pozadia jednotlivých veličín v tejto teórii je dôležité definovať prúdy odvodením z (6.34).

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{u_a^2 + u_b^2} \begin{bmatrix} u_a & u_b \\ u_b & -u_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

Okamžité prúdy so súradnicami  $\alpha, \beta$  sa ešte štiepia na dielčie podľa toho, či sú činné alebo jalové na uvažovanej osi.

Tu sú ich definície:

- Činná zložka okamžitého prúdu na osi  $\alpha$

$$i_{ap} = \frac{u_a}{u_a^2 + u_b^2} \cdot p \quad (6.36)$$

- Jalová zložka okamžitého prúdu na osi  $\alpha$

$$i_{aq} = \frac{u_b}{u_a^2 + u_b^2} \cdot q \quad (6.37)$$

- Činná zložka okamžitého prúdu na osi  $\beta$

$$i_{bp} = \frac{u_b}{u_a^2 + u_b^2} \cdot p \quad (6.38)$$

- Jalová zložka okamžitého prúdu na osi  $\beta$

$$i_{bq} = \frac{-u_a}{u_a^2 + u_b^2} \cdot q \quad (6.39)$$

Dosadením (6.36) až (6.39) do (6.34) a následným vyjadrením okamžitého výkonu  $p$  vzniknú uvedené vzťahy:

$$p = u_a \cdot i_{ap} + u_b \cdot i_{bp} + u_a \cdot i_{aq} + u_b \cdot i_{bq} = p_{ap} + p_{aq} + p_{bp} + p_{bq} \quad (6.40)$$

Je dôležité upozorniť, že okamžitý činný výkon je daný len pomocou:

$$p = u_a \cdot i_{ap} + u_b \cdot i_{bp} = p_{ap} + p_{bp} \quad (6.41)$$

keďže súčet okamžitých jalových výkonov na osiach  $\alpha, \beta$  je nulový:

$$u_a \cdot i_{aq} + u_b \cdot i_{bq} = p_{aq} + p_{bq} = 0 \quad (6.42)$$

Okamžité výkony vzťahu (6.40) sú vyjadrené nasledovne:

- Okamžitý činný výkon na osi  $\alpha$ ,  $p_{\alpha p}$

$$p_{\alpha p} = u_a \cdot i_{\alpha p} = \frac{u_a^2}{u_a^2 + u_b^2} \cdot p \quad (6.43)$$

- Okamžitý jalový výkon na osi  $\alpha$ ,  $p_{\alpha q}$

$$p_{\alpha q} = u_a \cdot i_{\alpha q} = \frac{u_a \cdot u_b}{u_a^2 + u_b^2} \cdot q \quad (6.44)$$

- Okamžitý činný výkon na osi  $\beta$ ,  $p_{\beta p}$

$$p_{\beta p} = u_b \cdot i_{\beta p} = \frac{u_b^2}{u_a^2 + u_b^2} \cdot p \quad (6.45)$$

- Okamžitý jalový výkon na osi  $\beta$ ,  $p_{\beta q}$

$$p_{\beta q} = u_b \cdot i_{\beta q} = \frac{-u_a \cdot u_b}{u_a^2 + u_b^2} \cdot q \quad (6.46)$$

Fyzikálna interpretácia dielčich výkonov, ktoré majú svorne jednotky Watt je nasledovná. Suma okamžitých činných výkonov na osi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p_{\alpha p} + p_{\beta p}$  podľa (6.41) zodpovedá reálnemu okamžitému činnému výkonu  $p(t)$ . Suma  $p_{\alpha q} + p_{\beta q}$  je stále nulová podľa (6.42). To je dôvod, prečo tento súčet neznamená príspevok ako k okamžitému, tak k priemernému toku energie medzi zdrojom a spotrebičom v trojfázovej sústave. Preto sa tieto veličiny nazývajú aj okamžité jalové výkony na osiach  $\alpha$ ,  $\beta$ . Ďalším zaujímavým záverom je spôsob kompenzácie pre jalové zložky. Keďže nereprezentujú žiadny tok energie (ani okamžitý), ich kompenzácia si nevyžaduje systém s akumuláciou energie.

Okamžitý výkon  $q$  zo vzťahu (6.34) je prepísaný aj do (6.47), kde je vykonaná jeho spätná transformácia, t.j. vyjadrenie pomocou fázových veličín.

$$q = u_b \cdot i_a - u_a \cdot i_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [(u_a - u_c) \cdot i_c + (u_b - u_c) \cdot i_a + (u_c - u_a) \cdot i_b] \quad (6.47)$$

Je potrebné rozoznávať túto veličinu od tradičného jalového výkonu. Preto sa zavádza nový pojem: *Imaginárny výkon  $q$*  s jednotkou (VAI – Volt-Ampere Imaginary). **Tento okamžitý výkon je mierou energie, ktorá sa vymieňa medzi fázami trojfázového systému.** Neodzrkadľuje výmenu energie medzi zdrojom a spotrebičom ako bolo príznačné pre jalový výkon v rámci konvenčnej Budeanovej teórie.

Pre porovnanie Budeanuovej teórie a Teórie okamžitých výkonov je vhodné uviesť nasledovné demonštratívne príklady.

§ Trojfázová symetrická sústava so sínusovým napätím napája vyváženú (rýdzo kapacitnú) trojfázovú záťaž. Po aplikovaní vzťahov (6.41) a (6.47) vzišli nasledovné výsledky pre Teóriu nepretržitých výkonov:

$$\begin{aligned} p &= 0 \\ q &= -3 \cdot \frac{U^2}{X_C} \end{aligned} \quad (6.48)$$

Tieto výsledky sú zhodné pre obe teórie. Avšak rozdiel je v interpretácii veličín. Budeanuova teória hovorí, že činný výkon je nulový, keďže stredná hodnota okamžitých výkonov je nulová. Hodnota trojfázového jalového výkonu odzrkadľuje mieru oscilácie energie (s dvojnásobnou frekvenciou) medzi zdrojom a spotrebičom.

Na druhej strane, Teória nepretržitých výkonov vysvetľuje, že k žiadnej oscilácii energie nedochádza (nulová hodnota  $p$ ). Imaginárny okamžitý výkon je konštantný a určuje mieru energie, ktorá sa vymieňa medzi fázami trojfázového systému. Inak povedané, kým sa jeden kondenzátor nabíja, druhé dva sa vybíjajú.

§ Trojfázová symetrická sústava so sínusovým napätím napája nevyváženú rýdzo kapacitnú záťaž (jeden kondenzátor napojený medzi na svorky prvej a druhej fázy). Výsledky pre Teóriu nepretržitých výkonov:

$$\begin{aligned} p &= 3 \cdot \frac{U^2}{X_C} \cdot \sin\left(2\omega t + \frac{p}{3}\right) \\ q &= -3 \cdot \frac{U^2}{X_C} \cdot \left[1 + \sin\left(2\omega t + \frac{p}{3}\right)\right] \end{aligned} \quad (6.49)$$

Pre konvenčnú teóriu by boli príznačné opäť výsledky s konštantným jalovým výkonom určitej veľkosti a nulovým činným výkonom.

Výsledky (6.49) by sa mali interpretovať nasledovne. Je jednoznačné, že oba výkony sú v čase meniace sa. Dokonca sa dá badať aj dvojnásobná frekvencia zmien, keďže sa kondenzátor nabíja a vybíja, Moment turbíny generátora bude musieť byť zvýšený v prípade nabíjania kondenzátora a znížený v prípade vybíjania kondenzátora. To vedie k tokom energie medzi zdrojom a spotrebičom, ktoré sú zahrnuté vo veličine  $p$ . Okamžitý imaginárny výkon opäť reflektuje mieru výmeny energie medzi jednotlivými fázami. Tá sa v čase mení, keďže ide o nevyváženú trojfázovú záťaž.

§ Pozn.: teória  $p$ - $q$  je čerpaná z literatúry [1].

#### Záver k hodnoteniu Teórie okamžitého výkonu

Táto teória poskytuje v porovnaní s klasickou teóriou väčšie množstvo (inak interpretovaných) informácií. Predchádzajúce popisované príklady to potvrdzujú.  $p$ - $q$  teória odkryla nesymetriu záťaže, pričom klasická teória nie je vypovedajúca o tomto aspekte. Podobné



je to s prítomnosťou harmonického skreslenia. V súčasnosti je teória užitočným aparátom pre riadenie aktívneho filtra. Princíp je založený na výpočte  $p$ ,  $q$ . Následne sa vytýčia časti veličín, ktoré je potrebné kompenzovať a pre tieto elementy sa prevedie spätná Clarkeova transformácia  $p$ ,  $q$  okamžitých výkonov. Výsledkom sú prúdy, ktoré sa injektujú do systému.

Je potrebné dodať, že táto teória bola uvedená v podobe pre trojvodičovú sústavu. Štvorvodičová sústava by si vyžiadala modifikáciu. Podrobný popis zákutí  $p$ - $q$  teórie však presahuje rámec tejto práce.

Okrem tejto teórie sú rozvinuté aj ďalšie, ktoré si vyžadujú pozornosť. Jedná sa teda o určité rozštiepenie na poli výkonových definícií. Väčšina aplikácií v elektrotechnike stále ostáva verná tradičnej metóde, ktorá je v majoritnom počte prípadov použiteľná. Ďalšia časť tejto práce bude v súlade s klasickou teóriou.

## 7 TECHNICKÁ REALIZÁCIA KOMPENZÁCIE ÚČINNÍKU

Kompenzačná jednotka na úrovni nn je realizovaná statickými kompenzátormi. Tie sú tvorené najčastejšie výkonovými kondenzátormi. Podľa individuálnych pomerov na odbernom mieste, kde je kompenzácia uvažovaná, sa volí spôsob kompenzácie podľa

- ú umiestnenia kondenzátorovej batérie,
- ú podľa spôsobu riadenia jalového výkonu,
- ú podľa ošetrenia kompenzačnej jednotky pred účinkami harmonického skreslenia.

### 7.1 Prevedenie kompenzácie z hľadiska jej umiestnenia

Z hľadiska umiestnenia jednotky rozoznávame kompenzáciu na:

- Individuálnu, kedy je kompenzácia prevedená priamo na svorkách spotrebiča. Týmto zásahom sa odľahčuje celá sieť od generátora až po spotrebič. Individuálna kompenzácia sa obyčajne využíva pri kontinuálnej prevádzke väčšieho spotrebiča alebo spotrebiča s konštantným jalovým výkonom. Príkladom môže byť statická kondenzátorová batéria na vykompenzovanie strát transformátora naprázdno.
- Skupinovú. V tomto prípade je kompenzačné zariadenie zapojené do bodu, odkiaľ je napájaný väčší počet spotrebičov (podružný rozvádzač). Vzhľadom k tomu, že spotrebiče nepracujú naraz (nesúdobosť činnosti), je potrebný menší kompenzačný výkon. Pri tomto riešení je potrebná regulácia jalového výkonu.
- Centrálnu. Kompenzačný rozvádzač je pripojený na prípojnice hlavnej rozvodne miestnej inštalácie, odkiaľ sú napojené všetky spotrebiče odberného miesta. Opäť je potrebný menší kompenzačný výkon ako pri väčšom počte individuálnych kompenzácií. Straty a úbytky napätí vďaka veľkým prenosovým vzdialenostiam v internej sieti môžu určiť toto riešenie ako neefektívne.

S ohľadom na konfiguráciu miestnej inštalácie a odberové charakteristiky jednotlivých spotrebičov sa vyberie optimálna možnosť centrálnej, skupinovej alebo kombinácie spomenutých s individuálnou kompenzáciou.

Obyčajne je základnou a pritom jedinou požiadavkou veľkoodberateľa dosiahnutie správnej hodnoty účinníka, ktorá sa pre potrebu distribučnej spoločnosti vypočíta z mesačných údajov spotreby činnej a jalovej (induktívnej) energie v predávacom bode (elektromer).

$$\cos j = \cos \left[ \arctan \left( \frac{E_{QL}}{E_P} \right) \right] \quad (7.1)$$

kde  $E_{QL}$  je spotrebovaná trojfázová jalová energia (Varh) a  $E_P$  činná energia (Wh).

Z tohto hľadiska je ideálne použiť centrálnu kompenzáciu, ktorá sa pripojí na hlavný rozvádzač. Takéto riešenie minimalizuje celkový inštalovaný kapacitný jalový výkon v porovnaní

s riešením viacerých skupinových kompenzácií (vďaka nesúdobnosti chodu jednotlivých zariadení). Skutočnosť, že sa kompenzácia rieši na jednom mieste sa pozitívne premietne do obstarávacích a prevádzkových nákladov.

Pri odbernom mieste, kde sú prítomné dlhé elektrické vzdialenosti k jednotlivým spotrebičom, je potrebné prehodnotiť centrálnu kompenzáciu s ohľadom na tieto otázky.

- Neovplyvní úbytok napätia vplyvom nevykompenzovanej spotreby funkčnosť vzdialenej záťaže?
- Budú straty vzniknuté vplyvom nevykompenzovaného spotrebiča akceptovateľné?
- Nedôjde k preťaženiu na prenosovej ceste k záťaži?

Úbytok napätia je možné odkontrolovať prostredníctvom vzťahu (7.2) pre jednofázové napájanie vzdialenej záťaže. Pre trojfázové napájanie platí vzťah (7.3). Líši sa výpočtom trojfázového činného prúdu. Počítajú sa napäťové úbytky medzi centrálnou kompenzáciou a samotným spotrebičom.

$$\Delta U = (R \cdot I_{\epsilon} + X_L \cdot I_j) = \left( R \cdot \frac{P_{1f}}{U_f} + X_L \cdot \frac{P_{1f}}{U_f} \cdot \operatorname{tg} j \right) \quad (7.2)$$

$$\Delta U = (R \cdot I_{\epsilon} + X_L \cdot I_j) = \left( R \cdot \frac{P_{3f}}{3 \cdot U_f} + X_L \cdot \frac{P_{3f}}{3 \cdot U_f} \cdot \operatorname{tg} j \right) \quad (7.3)$$

Pre výpočet je potrebná vedomosť menovitého fázového uhlu, s ktorým je prevádzkované zariadenie, vzdialenosti koncových zariadení od hlavnej rozvodne.

Je vhodné prevedenie výpočtu pre menovitý účinník spotrebiča ako aj pre  $\cos \varphi = 1$ . Porovnanie výsledkov dáva obraz o ovplyvňovateľnosti úbytkov napätia s ohľadom na umiestnenie kompenzácie.

Straty pri prenose energie do miesta spotreby vzdialenej  $l$  (km) od hlavného rozvádzača sa určujú nasledovne pre 1f rozvod (7.4) a pre 3f symetrický rozvod (7.5).

$$\Delta P = 2 \cdot R_K \cdot l \cdot (I_{\epsilon}^2 + I_j^2) = 2 \cdot R_K \cdot l \cdot \left[ \frac{\left( \frac{P_{1f}}{U_f} \right)^2}{\cos^2 j} \right] \quad (7.4)$$

$$\Delta P = 3 \cdot R_K \cdot l \cdot (I_{\epsilon}^2 + I_j^2) = 3 \cdot R_K \cdot l \cdot \left[ \frac{\left( \frac{P_{3f}}{3 \cdot U_f} \right)^2}{\cos^2 j} \right] \quad (7.5)$$

Opäť je možné porovnanie strát pre menovitý účinník zariadenia a pre plne vykompenzovaný stav. Straty jalových výkonov v dôsledku nevykompenzovanej záťaže v miestnej inštalácii nemajú dopad ani na funkčnosť samotného spotrebiča, ani na fakturované platby (platí sa za činnú elektrickú prácu), preto obyčajne nie sú brané na zreteľ.

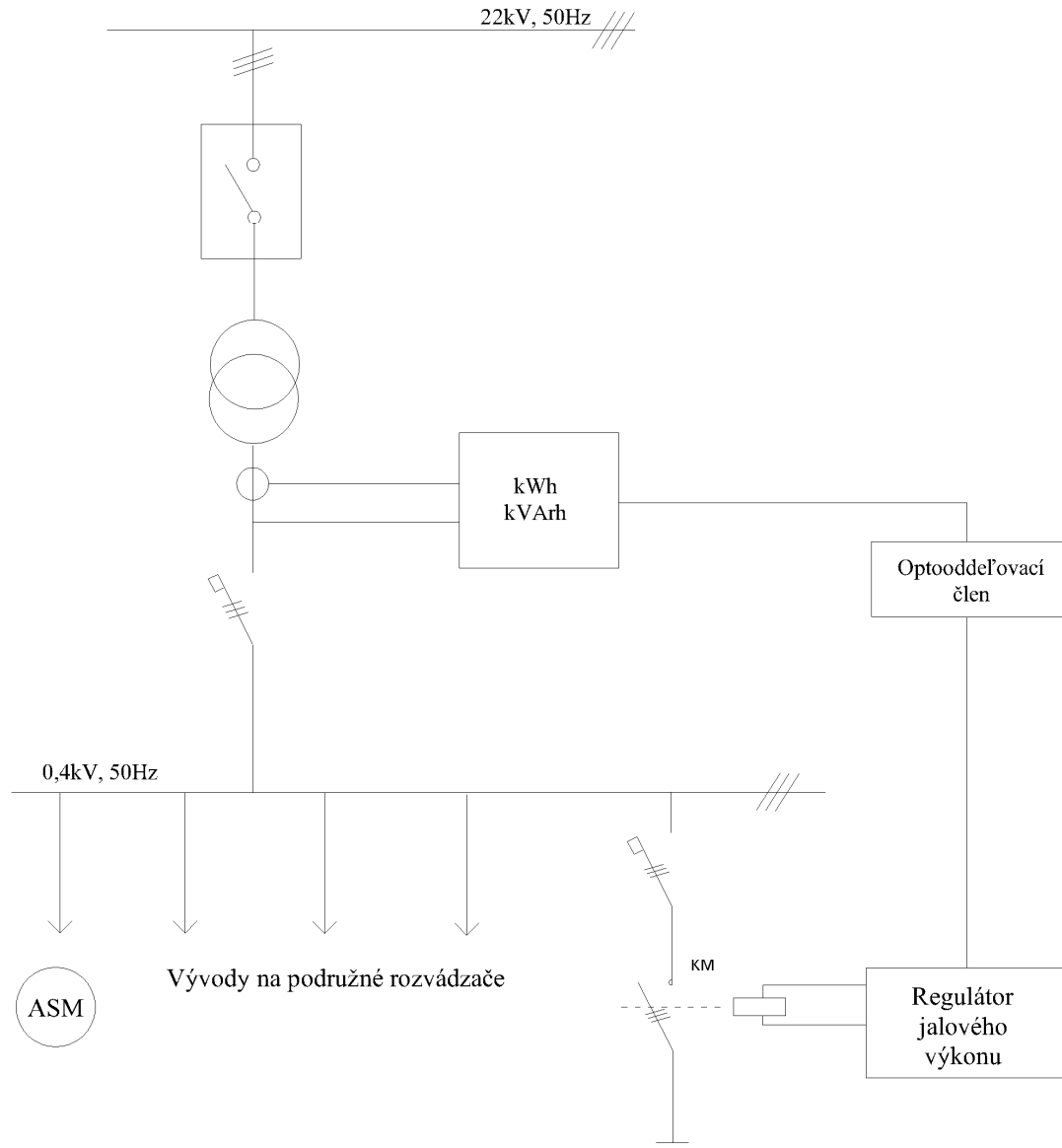
Tretím možným negatívom pri centrálnej kompenzácii je preťažovanie prenosových ciest na trase hlavný rozvádzač – spotrebič. V dôsledku toho môže dochádzať napríklad k opätovným výpadkom ističov na podružných rozvádzačoch. Je preto dôležité odkontrolovať hodnotu prúdu pretekajúcu medzi bodom napojenia kompenzačnej jednotky (hlavná rozvodňa) a spotrebičom podľa (7.6) pre 3f prúd.

$$I_{DOV} \geq \frac{P_{3f}}{3 \cdot U_f \cdot \cos \phi} \quad (7.6)$$

Ak by na základe uvedených výpočtov dochádzalo k vysokým úbytkom napätia alebo by celkový prúd prevyšoval menovitý prúd spínacích, istiacich, prenosových prvkov, je potrebné prehodnotiť kompenzačný systém. Potenciálne zlepšenie spočíva v priblížení kompenzácie k samotnému spotrebiču. Ak sa na mieste elektricky vzdialenom od hlavného rozvádzača nachádza skupina spotrebičov, je možné aplikovať skupinovú kompenzáciu bezprostredne v mieste spotreby. Ak sa jedná len o jeden spotrebič, je možné ho individuálne kompenzovať.

Je dôležité podotknúť, že paralelná kompenzácia zlepšuje napät'ové pomery, ale vyskytnú sa prípady, kedy sa kvôli dosiahnutiu požadovaného napätia musia použiť iné opatrenia (zosilnenie prenosovej cesty). Paralelná kompenzácia totiž nie je výhradný aparát na reguláciu napätia.

Ukážka centrálnej kompenzácie je na *obr. 7-1*. Kompenzačná jednotka je napojená na hlavný rozvádzač odberného miesta. Kondenzátory sú v tomto prípade pripojené cez istiace prvky a stykače. Mozog systému je tvorený regulátorom jalového výkonu, ktorý dostáva informácie o spotrebe jalového výkonu z elektromeru energetických závodov (EZ). Optooddeľovací člen je prítomný vďaka požiadavke EZ. Znemožňuje ovplyvňovateľnosť elektromeru prostredníctvom regulátoru. Regulátor zhodnotí, aký jalový kapacitný výkon sa musí zabezpečiť a spína prostredníctvom stykačov ideálnu kombináciu výkonových stupňov. Väčšina regulátorov má schopnosť otestovať jalový výkon jednotlivých kompenzačných stupňov.



Obr. 7-1: Centrálna kompenzácia účinníka

## 7.2 Prevedenie kompenzácie z hľadiska riadenia jalového výkonu

Základné delenie by sa dalo zhrnúť nasledovne:

- ú Stupňovito riadené kompenzácie
- ú Plynulo riadené – pasívne
- ú Plynulo riadené – aktívne

*literárny zdroj [16]*

Úvodným bodom pri tomto kroku návrhu kompenzačných jednotiek je určenie celkového jalového výkonu kompenzačnej jednotky.

Zo vzťahu (7.7) vyplýva veľkosť potrebného jalového výkonu kompenzačnej jednotky.

$$Q_C = P \cdot (\operatorname{tg} j - \operatorname{tg} j_K) \quad (7.7)$$

Vo vzťahu predstavuje  $P$  trojfázový činný výkon kompenzovanej záťaže,  $\varphi$  značí fázový uhol pre daný spotrebič,  $\varphi_K$  je požadovaný fázový uhol, ktorý je cieľom kompenzácie.  $Q_C$  je trojfázový jalový výkon kompenzačnej jednotky. Dimenzovanie tohto druhu je príznačné hlavne pre individuálnu kompenzáciu, kde sú známe menovité hodnoty jedného spotrebiča.

Pri navrhovaní centrálnej alebo skupinovej kompenzácie sa počíta aj s patričnou rezervou, ktorá by mala pokryť potrebu jalového výkonu aj pri rozširovaní odberu v rámci inštalácie. Preto je vzťah (7.7) (pre centrálnu / skupinovú kompenzáciu) skôr informatívny a berie sa do úvahy návrh uvažujúci okrem inštalovaného trojfázového výkonu a účinníku miestnych spotrebičov aj koeficient súdobnosti. K danému výsledku sa pripočíta rezerva.

Riešenie, ktoré ponúka optimálne nadimenzovanie kompenzačného jalového výkonu, je založené na meraní. Odberné miesto sa v tomto prípade spustí v skúšobnej lehote bez kompenzačnej jednotky. Záznamové prístroje namerajú maximálny jalový výkon za sledované obdobie na uvažovanom mieste kompenzácie. Zváži sa možnosť rozšírenia výroby a pripočíta sa určitý rezervný výkon.

Takéto riešenie je dostupné aj pri rekonštrukcii existujúcej kompenzácie.

Spôsoby, akým sa riadi jalový výkon kompenzácie, sú nasledovné.

### 7.2.1 Stupňovito riadené kompenzátory

Stupňovité riadenie kondenzátorov je tradičná metóda, ekonomicky najdostupnejšia. Pri návrhu si vyžaduje voľbu počtu a veľkosti jednotlivých stupňov. Obyčajne sa počet a veľkosť jednotlivých stupňov volí tak, aby kompenzačný systém celkového výkonu  $Q_C$  disponoval s dostatočnou presnosťou, na druhej strane však má byť ekonomicky rozumne navrhnutý. Počet jednotlivých stupňov je čiastočne ovplyvnený aj výstupmi regulátoru. Tento parameter však nie je veľmi obmedzujúci, keďže sa bežne používajú 14 stupňové regulátory. Moderné regulátory sú naprogramované tak, aby rovnomerne zaťažovali jednotlivé stupne a pritom dosahovali dostatočnú presnosť regulácie. K tomu je potrebná citlivosť prvého stupňa už na úrovni 5% (hodnota podložená v kap. 9) z celkového inštalovaného jalového výkonu. Ostatné kompenzačné stupne je vhodné s ohľadom na citlivosť voliť ako dvojnásobok predošlého stupňa až po úroveň kým suma nevyhovuje požadovanému jalovému výkonu (pomer kompenzačných stupňov 1:2:4:8, atď.). Napríklad pre kompenzáciu 100kVAr pri tomto postupe prislúcha riešenie: 5kVAr (5%) – 10 – 20 – 40 – 25kVAr. Posledný stupeň sa doplnil tak, aby bola suma 100kVAr.

Tento postup je variabilný a podlieha najmä skúsenostiam realizátora kompenzačných jednotiek. Ide o optimalizáciu na pomedzí potrebnej citlivosti regulácie a ceny kompenzačného zariadenia. Riešenie 100kVAr typu 2,5 – 2,5 – 5 - 9 x 10kVAr by určite vykázalo lepšie možnosti pre úplné vykompenzovanie, kondenzátory by mali dlhšiu životnosť, ale cena predurčuje prvú variantu za výhodnejšiu. Len kondenzátory sú o 35% lacnejšie v porovnaní s druhou variantou.

Najviac používaným spínacím prvkom stupňovitej kompenzácie je stykač. Moderné kompenzačné stykače sú usposobené k potlačeniu prúdových rázov, ktoré môžu byť sprevádzané pri spínaní kondenzátorov (najhorším prípadom je zopnutie vybitého kondenzátora pri maxime sieťového napätia). Tieto stykače sú vybavené pomocnými kontaktmi, ktoré spínajú s predstihom tlmiace odpory. Tým je dosiahnuté potlačenie zapínacích prúdových špičiek. Stykače sú elektromechanické systémy pripravené na menovitú spínanú periódu pohybujúcu sa rádovo v sekundách. Takáto rýchlosť kompenzácie však nemusí byť dostatočná. Platí to najmä pre spotrebiče, kde za krátky čas ( $k \times 0,1s$ ) dochádza k vysokým výkonovým rázom. Typickým prípadom je bodové zváranie. K zaisteniu potrebnej dynamiky slúži pri stupňovitej kompenzácii **technika bezkontaktného spínania** realizovaná tyristorovými spínacími modulmi.

K zopnutiu kondenzátorov dochádza pri nulovom napätí (typ. 5 V) na spínacom prvku a k rozopnutiu spínača dochádza pri prechode prúdu nulou. Výhody bezkontaktného spínania sú:

- + dlhá životnosť spínača (vysoký počet zopnutia a rozopnutia),
- + obmedzené prúdové a napäťové rušenie do siete (zopnutie a rozopnutie v nule),
- + rýchlosť zopnutia / rozopnutia.

Nevýhodami sú:

- vyššia obstarávacia cena,
- tepelné straty.

Pri použití pre spínanie kompenzačných kondenzátorov sa výhradne odporúča použiť chránenú kompenzáciu (téma pojednávaná neskôr), inak je nutné do série so spínačom zaradiť indukčnosť aspoň 12  $\mu H$  pre obmedzenie rýchlosti nárastu prúdu.

Pri návrhu kompenzačného zariadenia je teda nutné zvážiť ako intenzívne a frekventovane sa bude meniť jalový výkon. Jednak sa to môže zistiť z merania alebo na základe vedomostí o charaktere pripojených zariadení. Ak je frekvencia zmien jalového výkonu (nezanedbateľnej hodnoty) na úrovni menovitej frekvencie spínania stykačov, to znamená 2-3sekundy, je potrebné kompenzáciu vybaviť bezkontaktnými spínacími prvkami. Dimenzované sú podľa jalového výkonu kompenzačných stupňov. Týmto riešením sa predíde predčasnému poškodeniu stykačov, kondenzátorov, ako aj penalizačným nákladom.

Ďalej sú z hľadiska riadenia jalového výkonu uvažované plynulo riadené – pasívne kompenzácie, ktoré sa v oblasti nn používajú len zriedkavo a plynulo riadené – aktívne. Patria sem aktívne filtre, ktoré sú inštalované najmä z dôvodu eliminovania harmonického skreslenia.

### 7.2.2 Plynulo riadené kompenzácie – pasívne

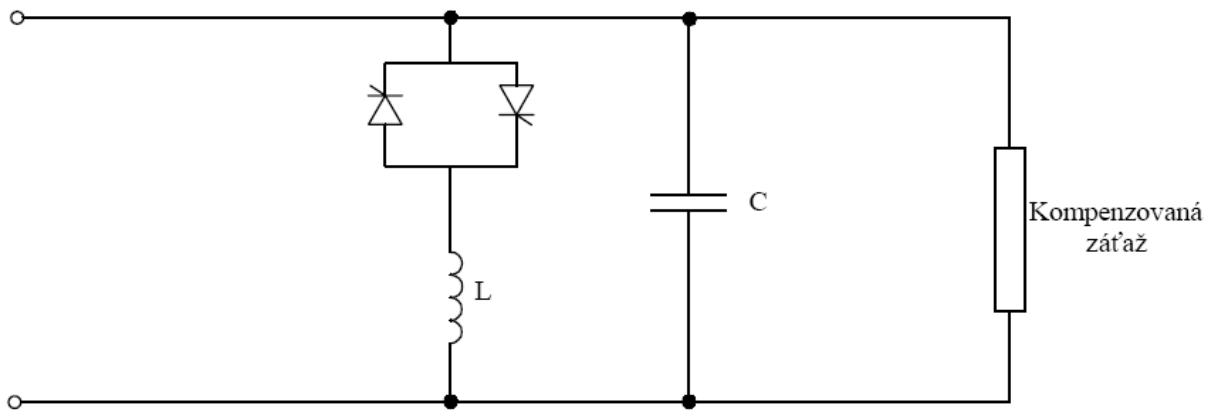
Kondenzátor je elektrický prvok, ktorý je citlivý na spínacie akcie (prechodné javy), preto sa vyvinul tento typ regulácie jalového výkonu. Schéma tejto kompenzácie pre jednofázový prípad je zobrazená na *obr. 7-2*. Pri tomto spôsobe riadenia sú kondenzátory konštantne pripnuté a reguluje sa jalový výkon tlmivky, ktorá vykompenzuje nadbytočný kapacitný jalový výkon. Konkrétne sa využíva tyristorový spínač v antiparalelnom zapojení, ktorý prostredníctvom uhlu zopnutia  $\alpha$  určuje prúd induktorom a teda jalový výkon. Výsledný jalový prúd bude mať hodnotu

$$I_k = I_C - I_L \quad (7.8)$$

a výsledný jalový výkon bude mať hodnotu

$$Q_k = Q_C - Q_L \quad (7.9)$$

Tento typ regulácie je vhodný na miestach, kde je potrebná rýchla zmena kompenzačného výkonu. Dostáva sa však do úzadia vďaka novým technológiám, konkrétne bezkontaktnému spínaniu kondenzátorov alebo aktívnym filtrom.



Obr. 7-2: Schéma plynulo riadenej kompenzácie jalového výkonu dekompenzačnými tlmivkami [16]

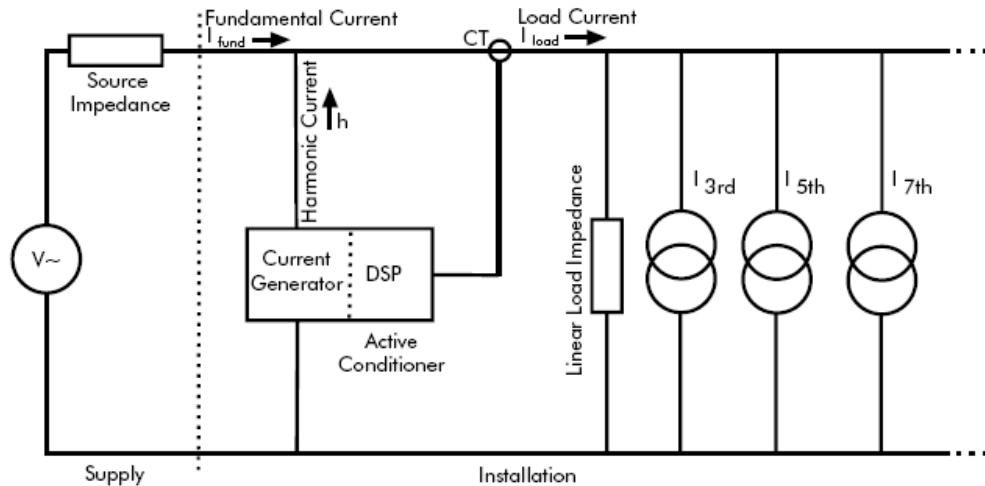
### 7.2.3 Plynulo riadené kompenzácie - aktívne

Objavujú sa určité špeciálne prípady, kedy zatiaľ uvedené princípy kompenzácie nemôžu vyhovieť. Je to obyčajne prípad, keď je nemožné osadiť do odberného miesta stupňovitú kompenzáciu (ani chránenú) v dôsledku špecifického harmonického skreslenia. Môže sa jednať o dynamicky meniace sa harmonické spektrum. V tomto prostredí by bolo neúčelné inštalovať pasívny filter presne dimenzovaný na špecifické zložky. Ako vhodné riešenie sa pri danom probléme ponúka aktívny filter, ktorý je schopný sklbiť hneď niekoľko nápravných mechanizmov do svojej oblasti pôsobenia.

Všeobecne existujú dva typy filtrov. Paralelný (aktívny) filter má vplyv na prúdovú kvalitu. Sériový filter (linkový kondicionér) zlepšuje kvalitu napätia. Pre kompenzačné účely je vhodný **paralelný aktívny filter**.

Bloková schéma zapojenia je na obr. 7-10. Princíp činnosti je nasledovný. Merací transformátor deteguje prúd záťaže. Riadiaca jednotka (DSP) vyhodnotí harmonické spektrum prúdu a vyšle povel pre prúdový generátor, aby injektoval do siete prúdové zložky opačnej fázy, ktoré anulujú jestvujúce vyššie harmonické zložky.





Obr. 7-3: Princíp aktívneho filtra[21]

Výsledný prúd môže byť úplne ošetrovaný od deformácie, prípadne sa môžu „filtrovať“ len určité harmonické rády (selektívna filtrácia). Pomocou súsledných a spätných zložiek je možné upravovať nesymetrickú záťaž na symetrickú. [16]

Čo je zaujímavé z hľadiska kompenzácie účinníku, generovaním jalovej zložky prvej harmonickej sa dosahuje veľmi rýchla a účinná kompenzácia jalového prúdu. Avšak riešenie kompenzácie paralelným aktívnym filtrom by bolo finančne nákladné. Použitie je motivované silne zarušenou sieťou s dynamicky meniacim sa harmonickým spektrom.

### 7.3 Prispôbenie kompenzácie energetickému rušeniu

Ako vyplynulo z predchádzajúcej kapitoly, na nnej hladine sa využíva prevažne stupňovitá kompenzácia. V rámci nej existujú tri stupne riešenia harmonického skreslenia.

- § Prosté kondenzátory, prípadne kondenzátory s vyššou menovitou hodnotou napätia
- § Chránené kompenzácie
- § Pasívne filtre

V niektorých špeciálnych prípadoch je optimálne zvoliť aktívny filter.

#### 7.3.1 Kondenzátory

Aplikácia prostých kondenzátorov je najjednoduchším riešením kompenzácie účinníku. Trojfázové kondenzátory sú zapojené podľa inštrukcií výrobcu, v prevažnej väčšine však do trojuholníka. Pri tomto zapojení je postačujúca tretinová kapacita v porovnaní so zapojením do hviezdy.

Pre trojfázový výkon kondenzátoru, ktorý je zapojený do trojuholníka, platí:

$$Q_C = 3 \cdot U_{zdr}^2 \cdot w \cdot C_{\Delta} \quad (7.10)$$

Pre trojfázový výkon kondenzátoru zapojený do hviezd, platí zdanlivo rovnaký vzťah:

$$Q_C = 3 \cdot U_f^2 \cdot w \cdot C_Y \quad (7.11)$$

Zo vzťahov (7.10), (7.11) je pozorovateľná dôležitá vlastnosť kondenzátorov. Jalový výkon závisí kvadraticky na pripojenom napätí. Rozdiel medzi uvedenými vzťahmi spočíva vo veľkosti napájacích napätí. Kým pri zapojení do trojuholníka sú kondenzátory priložené na združené napätie  $U_{zdr} = \sqrt{3} \cdot 230V$ , pri zapojení do trojuholníka sú napájané napätím  $U_{zdr} = 230V$ . S prihliadnutím na spomínanú kvadratickú závislosť výkonu na napätí je zrejmé, že pri zapojení do trojuholníka je postačujúce použiť kondenzátory s trikrát menšou kapacitou. Spomenuté údaje sú zahrnuté na štítku kondenzátorov.

Kapitola 6.3 bola venovaná nástrahám, ktoré môžu vážne ohroziť funkčnosť kompenzačných jednotiek. Kondenzátory boli predstavené ako citlivý element, ktorý môže byť poškodený niekoľkými spôsobmi. Výrazným činiteľom je harmonické skreslenie. Dá sa povedať, že väčšina mechanizmov ústi do zvýšeného tepelného namáhania.

Riešenie symptómov zahŕňa zabezpečenie vhodného klimatického prostredia kondenzátora. Problémy s preťažovaním kondenzátora teda možno zmierniť vhodným chladením kompenzačného rozvádzača, prípadne klimatizáciou rozvodne.

Iným riešením dôsledkov je zvýšenie menovitej hodnoty kondenzátora, napr. na 440V. Namáhanie kondenzátora sa kvadraticky zníži s poklesom napätia. Ak bude kondenzátor s menovitou hodnotou  $U_N = 440V$  napájaný napätím 400V, pomer medzi skutočným jalovým výkonom  $Q_s$  a štítkovým jalovým výkonom  $Q_N$  bude nasledovný:

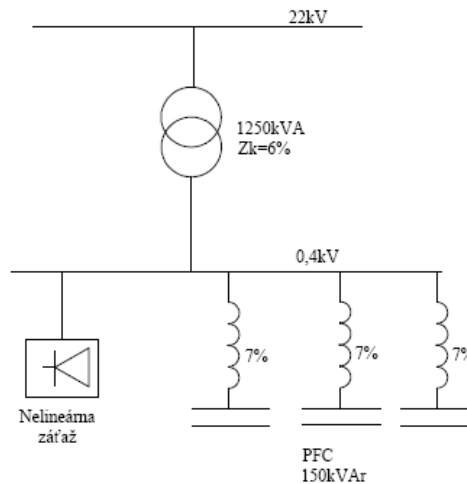
$$\frac{Q_s}{Q_N} = \frac{\frac{U^2}{X_C}}{\frac{U_N^2}{X_C}} = \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 = \left( \frac{400}{440} \right)^2 = 0,82 \quad (7.12)$$

Keďže sú dielektrické, resp. tepelné straty úmerné výkonu, voľba kondenzátorov s vyššou menovitou hodnotou napätia sa môže považovať ako základné opatrenie voči účinkom harmonického skreslenia. Negatívum spočíva v znížení dodávaného jalového výkonu v porovnaní s menovitou hodnotou. Je nutné podotknúť, že sa týmto opatrením rieši následok, nie príčina. Ak k preťaženiu kondenzátora naozaj dôjde, obyčajne je nádoba kondenzátoru chránená proti roztrhnutiu pretlakovým odpojovačom, ktorý zaistí bezpečné odpojenie kondenzátoru zo siete pri skrate a na konci vlastnej životnosti.

Český výrobca kondenzátorov ZEZ Silko navrhuje použiť kondenzátory s menovitou hodnotou 440V pri  $THD_U$  vyššom ako 2% a nižšom ako 3,5%.

### 7.3.2 Chránené kompenzačné jednotky

Jedným zo spôsobov, ako ochrániť kompenzačné zariadenia pred účinkami harmonických, je realizácia chránenej kompenzácie. Tá sa prevádza sériovým zapojením tlmivky ku kompenzačnému kondenzátoru (obr. 7-4). Takéto zapojenie môže byť rôznoúčelové. Podľa nastavenia rezonančnej frekvencie LC systému sa môže jednať o chránenú kompenzačnú jednotku alebo ostrý filter harmonických prúdov. Určujúcim je v tomto smere nastavenie rezonančnej frekvencie.



Obr. 7-4: Schéma chránenej kompenzácie

V prípade chránenej kompenzácie sa rezonančná frekvencia LC systému nastavuje na hodnoty, ktoré ležia v pásme medzi harmonickými frekvenciami. Typické rezonančné frekvencie L-C systému, ktoré slúžia na ochranu kompenzačných kondenzátorov pred preťažením harmonickými prúdmi sú: 189Hz (p=7%), 204Hz (p=6%) alebo 134Hz (p=14%). Údaj v zátvorke sa nazýva činiteľ zatlmenia a znamená podiel indukčnej reaktancie tlmivky ku kapacitnej reaktancii kondenzátora pri nominálnej frekvencii.

Napríklad pre 189Hz prislúcha 7%. To znamená, že pri frekvencii 50Hz je indukčná reaktancia tlmivky  $X_L$  na úrovni 7% kapacitnej reaktancie kondenzátora  $X_C$ . Keďže sa reaktancie vyvíjajú podľa (obr. 7-5), nepriamo tento koeficient vypovedá o rezonančnej frekvencii systému. Dá sa vypočítať pomocou nasledovných vzťahov.

$$f_{res} = 50 \cdot \sqrt{\frac{100}{p}} \quad (7.13)$$

Pre 7% je rezonančná frekvencia teda:

$$f_{res7\%} = 50 \cdot \sqrt{\frac{100}{7}} = 188,98 \text{ Hz} \quad (7.14)$$

LC systém nastavený na danú rezonančnú frekvenciu medzi dominantnými harmonickými má tieto dôsledky na celkový výkon kompenzačného stupňa. Pri základnej frekvencii prevažuje kapacitná reaktancia, ktorej jalový výkon je znížený kvôli prítomnosti ochrannej tlmivky.

Tlmivka spôsobuje zvýšenie napätia na kondenzátore, preto je nutné aplikovať kondenzátor aj tlmivku s vyšším menovitým napätím (440V / viac).

Nárast napätia na kondenzátore je daný vzťahom (7.15).

$$U_c = \frac{U_s}{1-p} \quad (7.15)$$

kde  $U_s$  je sieťové napätie, na ktoré je pripojený LC člen.

Trojfázová reaktancia LC systému má hodnotu vypočítanú podľa (7.16).

$$X_{LC} = X_c \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) = 3 \cdot \frac{U_{CN}^2}{Q_c} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad [16] \quad (7.16)$$

Pre konkrétny prípad LC stupňa s kondenzátorom s menovitým napätím  $U_{CN} = 440V$ , s menovitým jalovým výkonom  $Q_c = 25kVAr$  a tlmivky 7%, 440V bude výsledok trojfázovej reaktancie nasledovný:

$$X_{LC} = 3 \cdot \frac{440^2}{25000} \cdot \left(1 - \frac{7}{100}\right) = 21,605\Omega \quad (7.17)$$

Trojfázový jalový výkon sa počíta podľa (7.18).

$$Q_{LC} = 3 \cdot \frac{U^2}{X_{LC}} \quad (7.18)$$

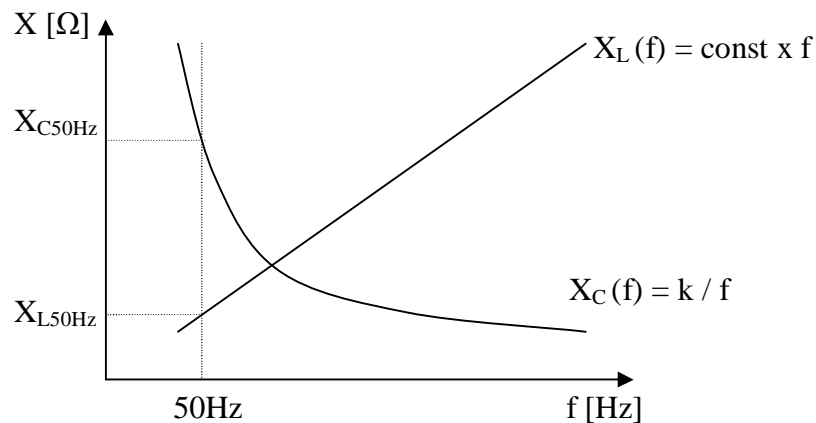
Pri uvažovanom prípade sa LC systém pripojí na sieťové napätie, ktoré je obyčajne 400V. Hodnota trojfázového jalového výkonu je daná výpočtom (7.10).

$$Q_{LC} = 3 \cdot \frac{400^2}{21,605} = 22,2kVAr \quad (7.19)$$

Z výpočtov je vidieť, že jalový výkon kompenzačného stupňa sa zredukoval z pôvodných 25kVAr na 22,2kVAr. Túto skutočnosť je potrebné brať na zreteľ pri navrhovaní kompenzácií s predradenou tlmivkou.

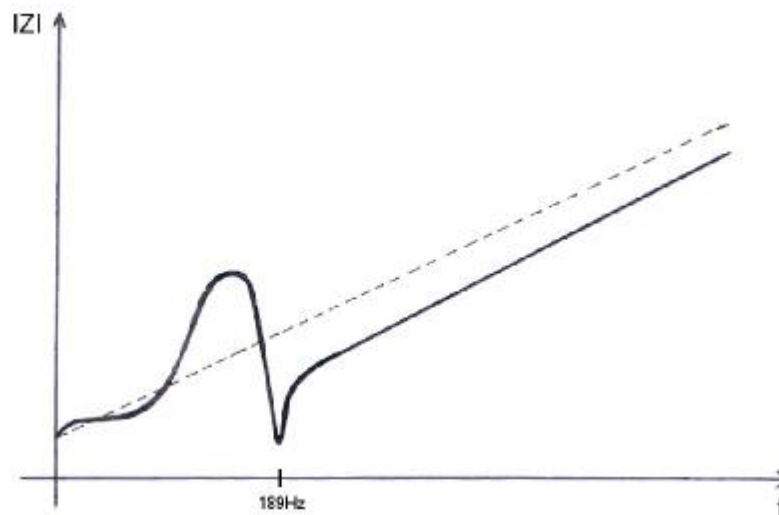
Chránená kompenzácia je vhodná na miestach, kde je harmonické skreslenie intenzívne a mohlo by dochádzať k preťažovaniu kondenzátorov harmonickými prúdmi v dôsledku nižšej impedancie pre vyššie harmonické rády (obr. 7-5). Po pripojení tlmivky sa táto nebezpečná vlastnosť eliminuje. Ako je vidieť z obr. 7-5, vo frekvenčnom pásme nad rezonančnou frekvenciou dominuje indukčná reaktancia tlmivky, ktorá lineárne rastie s frekvenciou. To znamená, že kompenzačný stupeň má dosť vysokú impedanciu na to, aby nebol prúdovo preťažovaný pri frekvenciách nad rezonančným bodom. Takto sa obmedzujú aj impulzné prúdy (prúdové zákmity), ktoré by za bežných okolností porušili funkčnosť kondenzátoru. Prúdový

impulz sa všeobecne skladá z harmonických zložiek vysokých rádov, pre ktoré bude chránený kompenzačný stupeň cestou s vysokou impedanciou.

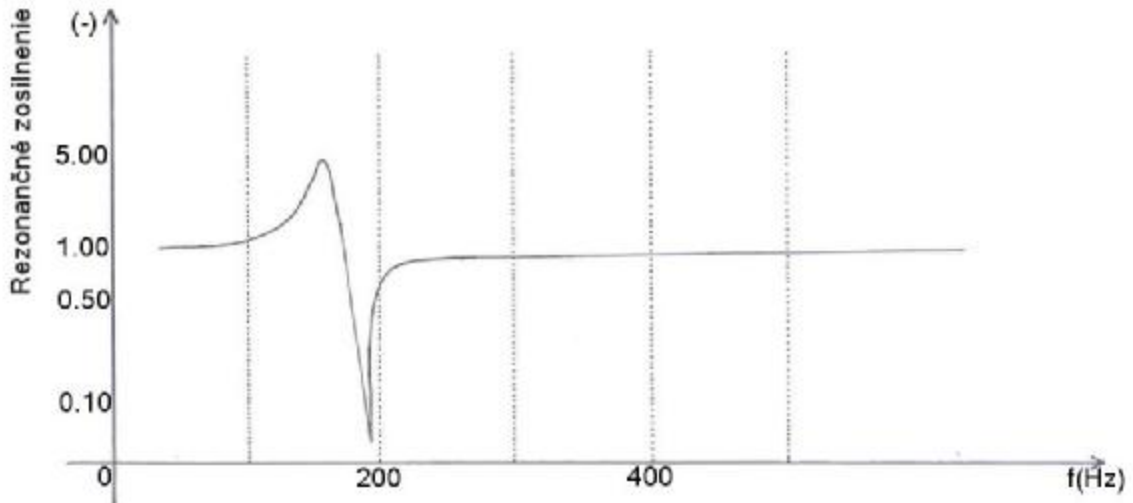


Obr. 7-5: Náčrt frekvenčných závislostí indukčnej reaktancie  $X_L$  a kapacitnej reaktancie  $X_C$

Iným pozitívnym javom, pre ktoré našli chránené kompenzácie uplatnenie, je zatlmenie kompenzácie pre možnosť rezonancie so sieťou na frekvenciách, ktoré prevyšujú rezonančnú frekvenciu. Príčina znovu tkvie v indukčnej povahe LC obvodu v oblasti nad rezonančnou frekvenciou. Keďže je sieť obecné indukčného charakteru, nemôže dochádzať k rezonancii medzi dvomi indukčnými prvkami. Na obr. 7-6 je vyobrazená impedančná charakteristika v mieste pripojenia chránenej kompenzácie. Následne jej zodpovedá krivka rezonančného zosilnenia na obrázku 7-7. Obidva obrázky potvrdzujú charakter a význam chránenej kompenzácie.



Obr. 7-6: Impedančná charakteristika v mieste pripojenej chránenej kompenzácie



Obr. 7-7: Rezonančné zosilnenie pôsobením rôznych chránených kompenzácií [11]

Potom, ako bolo objasnené správanie a účinok chránenej kompenzácie, je potrebné zostaviť reťazec podmienok, na základe ktorého sa odporúča jej použitie.

V optimálnom prípade by podmienka o použití chránenej kompenzácie bola nasledovná.

1. Namodeluje sa sieť s pripojenou kompenzáciou a vypočíta sa vážené celkové harmonické skreslenie napätia (vzťah 6.12). Ak presiahne úroveň 130% (čo by viedlo k 1, 3násobnému prúdu kondenzátorom), je potrebná chránená kompenzácia. Kompenzácia je taktiež potrebná, ak sa body paralelnej rezonancie získanej impedančnej charakteristiky prelínajú s harmonickými prúdmi od nelineárneho spotrebiča (meranie prúdového spektra).

2. Iný spôsob určenia nutnosti chránenej kompenzácie je založený na kombinácii merania a výpočtu rezonančných bodov. Pre paralelnú rezonanciu prislúcha frekvencia daná vzťahom

$$f_p = f_n \cdot \sqrt{\frac{S_s}{Q_c}} \quad (7.20)$$

kde  $f_n$  predstavuje nominálnu frekvenciu,  $S_s$  je skratový výkon siete (VAr),  $Q_c$  je výkon kompenzačnej jednotky (VAr). Ďalej, rezonančná frekvencia sériovej rezonancie je daná prostredníctvom (7.21).

$$f_s = f_n \cdot \sqrt{\left( \frac{S_t}{Q_c \cdot e_k} - \frac{P_{odb}^2}{Q_c^2} \right)} \quad [16] \quad (7.21)$$

kde  $S_t$  predstavuje výkon transformátora,  $e_k$  je napätie nakrátko transformátora,  $P_{odb}$  je činný výkon odberu, ktorý sa kompenzuje.

Ak sa uvedené vypočítané rezonančné body systému zhodujú s frekvenciami odmeraných harmonických (medziharmonických) zložiek prúdu a napätia, je potrebná chránená kompenzácia. Okrem toho by sa znovu mal zohľadniť faktor váženého THD<sub>U</sub>.

Pri návrhu stupňovitej kompenzácie sú popisované forma kontroly problematické, pretože zmena konfigurácie siete a hlavne spínanie kompenzačných stupňov mení impedančnú charakteristiku (rezonančné frekvencie) v bode pripojenia kompenzácie, ako aj vážené  $THD_U$ .

3. Preto je rozhodnutie o použití chránenej kompenzácie zjednodušené a založené na podieli výkonu nelineárnej záťaže z celkového výkonu. Na základe skúseností špecializovaných firiem je vhodné použiť **chránenú kompenzáciu pri podieli nelineárnych spotrebičov nad 10% z menovitého výkonu transformátora.**

„Prosté kondenzátory je možné použiť pre kompenzáciu jalového výkonu v sieťach nízkeho i vysokého napätia s malými úrovňami energetického rušenia, t.j. v sieťach, kde podiel inštalovaného výkonu nelineárnych spotrebičov nepresahuje 10-15%.“ [16]

Iným zaužívaným štandardom je rozhodnutie na základe celkového harmonického skreslenia napätia v uvažovanom mieste pripojenia kompenzácie. Chránená kompenzácia sa odporúča pri úrovni  $THD_U$  nad 3,5% (údaj ZEZ Silko).

Pri voľbe rezonančnej frekvencie chránenej kompenzácie je nutné uvážiť frekvenciu HDO. Rezonančná frekvencia systému ju nesmie ovplyvňovať. Obyčajne sa bod rezonancie volí pod dominantnú harmonickú zložku napätia (najčastejšie na 189Hz). Musí sa pritom dodržať podmienka, že intenzita harmonických (madziharmonických) zložiek napätia v nechránenej frekvenčnej oblasti pri meraní bez kompenzácie nepresiahne približne 30% v porovnaní s dominantnou harmonickou zložkou napätia. Opodstatnenosť tejto podmienky je vysvetlená na nasledovnom príklade. Ak by tretia harmonická bola na úrovni napr. 90% z piatej harmonickej zložky napätia, inštalovaním chránenej kompenzácie 7% by ľahko mohlo dôjsť k paralelnej rezonancii v nechránenej oblasti (pod  $f_R$ ) podľa obr. 7-7. Pri takýchto stavoch ( $U_3 > 0,3 \times U_{h\_dominant}$ ) je potrebné zahrnúť do chránenej oblasti aj tretiu harmonickú výberom 14% kompenzácie.

Podľa vzťahu (7.15) je potrebné zohľadniť fakt zvýšeného napätia na kondenzátore a prispôbiť jej menovitú hodnotu.

Obyčajne sa tlmivky vyrábajú pre rezonančné frekvencie 134Hz, 189Hz, 204Hz. Je dôležité sa vyhnúť frekvencii HDO z bezpečnej vzdialenosti. V opačnom prípade by mohlo dochádzať k odsávaniu HDO zo siete alebo jeho nadmernému zosilňovaniu. Pre HDO signál 216,6Hz je rezonančná frekvencia chránenej kompenzácie 189Hz prijateľná.

Väčšina realizácií chránených kompenzácií zodpovedá rezonančným frekvenciám nastavených medzi tretiu a piatu harmonickú. Dôvodom je jednak skladba kompenzačných komponentov. Pre kompenzáciu s činiteľom zatlmenia  $p = 7\%$  ( $f_R = 189\text{Hz}$ ) vyhovuje kondenzátor s menovitou hodnotou napätia  $U_{CN} = 440\text{V}$ . Pre  $p = 14\%$  ( $f_R = 134\text{Hz}$ ) je potrebné aplikovať kondenzátory s menovitou hodnotou  $U_{CN} = 525\text{V}$ . Z hľadiska hmotnosti a veľkosti je tlmivka zhruba o 50% ťažšia v porovnaní s prvým prevedením. Údaje sú čerpané z katalógových listov producenta kompenzačných komponentov ZEZ-Silko. Ďalším dôvodom je návrh na základe empirie dodávateľov. Každé riešenie si však vyžaduje individuálny prístup.

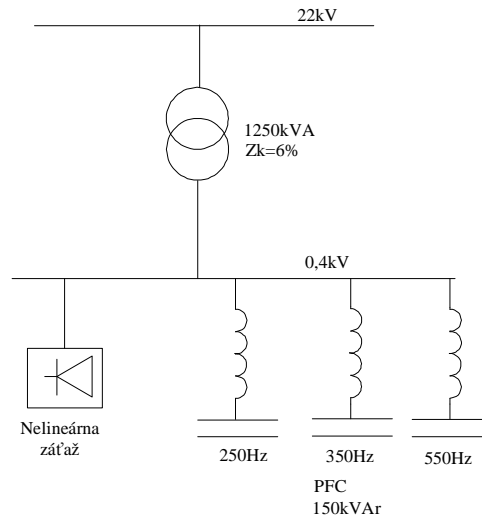
Realizáciu chránenej kompenzácie je potrebné prehodnotiť najmä v odberných miestach, kde je produkované vysoké harmonické skreslenie prúdu. Prítomnosťou chránenej kompenzácie sa elektrická sieť nevyčistí od emisií vyšších harmonických prúdov. Ochráni však kompenzačné kondenzátory pred preťažením.

### 7.3.3 Pasívne filtre

Iný prístup k harmonickému skresleniu zahŕňa vyfiltrovanie vyšších harmonických zložiek prúdu zo siete. K tomu môže slúžiť pasívny filter. Zabráni sa tým šíreniu harmonických zložiek vyšších rádov po vedení a eliminuje sa tak v bode pcc harmonické skreslenie napätia, ktoré by vnímali aj ostatní odberatelia elektrickej energie.

Technická realizácia je principiálne rovnaká (obr. 7-8) ako pri chránenej kompenzácii, akurát jednotlivé stupne sú naladené na rezonančnú frekvenciu, ktorá je v tesnej blízkosti od frekvencie filtrovanej harmonickej zložky. Vytvorí sa tak pre vybrané harmonické zložky cesta s minimálnou impedanciou, čím sa zabezpečí účinné odsávanie dominantných zložiek. Filtračné obvody preto musia byť prispôbené zaťažovaniu na úrovni blízkej rezonancii.

Väčšia časť harmonických prúdov je pohlcovaná vo filtri a zvyšná časť nespôsobuje zhoršenie podmienok kvality elektrickej energie s ohľadom na ostatné elektrické zariadenia. Je taktiež možné, že filter bude odsávať aj harmonické prúdy spôsobené iným odberným miestom.

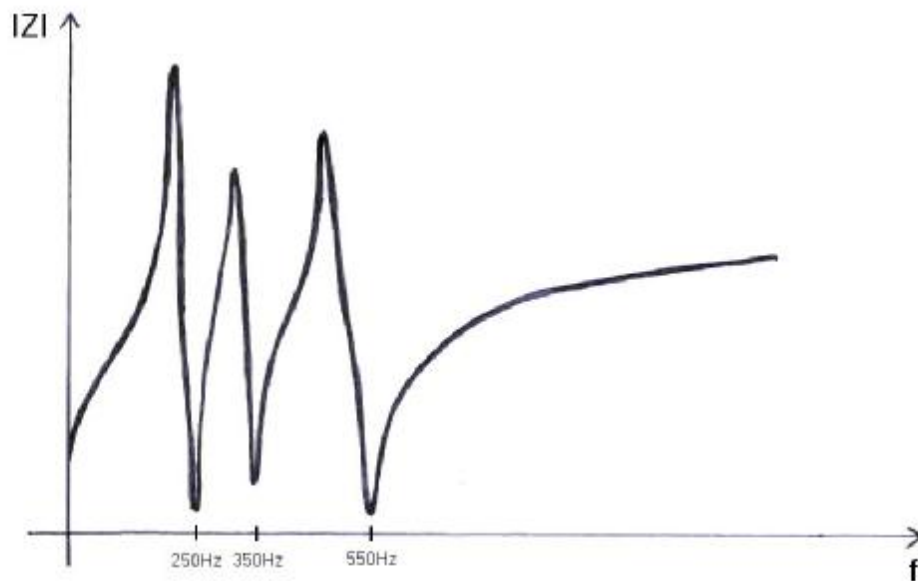


Obr. 7-8: Schéma pasívneho filtra

Impedančné charakteristiky jednotlivých vetiev sú naznačené obrázku 7-9. Obrázok reflektuje nastavenie rezonančných frekvencií priamo na harmonické zložky. V reálnej situácii sa tieto body posúvajú o 5-10Hz, aby sa nepreťažil filtračný stupeň. Pre vybrané rezonančné frekvencie je impedancia minimálna a vytvára tak táto vetva podmienky pre odsávanie harmonickej zložky prúdu príslušného rádu. Je dôležité dodržať správnosť poradia zapínania a vypínania jednotlivých vetiev. Zapínanie sa musí zahájiť vetvou, ktorá slúži na filtrovanie najnižšieho rádu. Nasledujú postupne vyššie rády. S vypínaním je to práve naopak. Pri



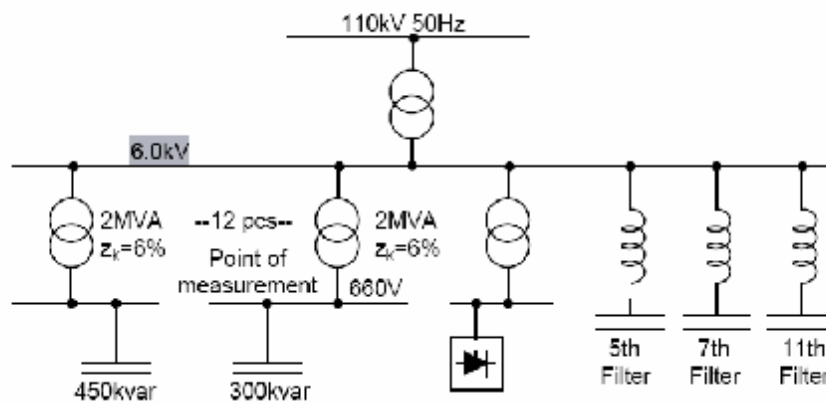
nedodržaní tohto sledu môže impedančná charakteristika vykázat vysokú hodnotu impedancie pre dominantnú harmonickú. čím sa môže vytvorit' bod paralelnej rezonancie.



Obr. 7-9: Impedančná charakteristika pri prítomnosti pasívneho filtra [13]

Pasívny filter bol zaradený do skupiny stupňovito riadených kompenzátorov. Nie sú určené prioritne na kompenzáciu účinníku. Je to však ich vedľajší efekt, keďže pre základnú harmonickú má každá vetva kapacitnú povahu. Reguláciou kompenzačného výkonu by sa vypínali aj jednotlivé vetvy a tým by sa odstránila filtračná vlastnosť. Preto sa kompenzácia účinníku ako aj pasívna filtrácia prevádza separátne, ako je naznačené na obr. 7-10.

Je potrebné dodať, že sa filtrovanie v oblasti nn je veľmi zriedkavý jav. Prístroje používané v tejto hladine musia vyhovieť vzťahujúcim sa normám (ČSN EN 61000-3-2), ktoré vypovedajú o maximálnych emisiách od spotrebičov s  $I_n < 16A$ . To znamená, že v prípade potreby sa vybavujú internými filtrami. Výkonovo väčšie prístroje, kde sa filtrovanie vykonáva oddelene (napr. oblúčkové pece), sa obyčajne pripájajú do hladiny vn.



Obr. 7-10: Oddelená kompenzácia a filtrácia [24]

Ak má prítomné harmonické skreslenie takú intenzitu, ktorá je pre prevádzku prítomných spotrebičov neprípustná, je potrebná filtrácia. Môže sa previesť pasívny filter, ktorý je naladený pre presne definovanú frekvenciu. Vyrába sa na mieru podľa potreby zákazníka. V sieti nn je raritou. Ak sa harmonické spektrum v čase mení, je potrebné použiť aktívny filter.

## 7.4 Ostatné hľadiská pri návrhu kompenzačnej jednotky

Riešenie kompenzačného rozvádzača na úrovni projektovej dokumentácie nie je cieľom tejto práce. Dimenzovanie vodičov, istiacich, spínacích prvkov je v súlade so zásadami projektovania elektrických zariadení. Za zmienku stojí niekoľko dôležitých faktorov, ktoré sú pre kompenzátory príznačné.

Kondenzátory sú z hľadiska životnosti ovplyvňované teplotou okolia. Pre jednotlivé druhy sú stanovené koridory prevádzkových teplôt (napr. pre kondenzátory ZEZ Silko je najvyšší denný priemer 45°C, najvyšší ročný priemer je 35°C). V mnohých prípadoch je teplota v miestnych rozvodniach vyššia, vtedy je dôležité aplikovať nútenú ventiláciu, resp. zabezpečiť účinnú klimatizáciu miestnosti.

Je dôležité dbať na správny výber kompenzačných regulátorov. Hlavne do inštalácie so zvýšeným harmonickým skreslením je nutné osadiť regulátor, ktorý meria skutočné efektívne hodnoty. Okrem toho by mal vedieť rozpoznávať činnú a jalovú zložku prvej harmonickej, podľa ktorej prebieha regulácia. Regulátor by mal byť štvorkvadrantný s tromi napäťovými a tromi prúdovými vstupmi. Ak by meranie prebiehalo len na jednej fáze, mohlo by dôjsť k nepresnej regulácii v dôsledku odberovej nesymetrie. Veľmi užitočnou vlastnosťou regulátora je zábrana voči okamžitému prekompenzovaniu. [16]

Ďalším faktorom pri realizácii kompenzácie jalového výkonu je možná prítomnosť záložného napájania diesel agregátom (synchronný generátor) pre odberné miesto. Táto súvislosť môže ohroziť jednak kompenzáciu, ako aj spotrebiče. Pri naštartovaní záložného napájania dochádza k resetu systému kompenzácie. Nasleduje testovanie jalového výkonu jednotlivých stupňov regulátorom postupným zapínaním kondenzátorov. Ak pracuje synchronný generátor v ostrovnom režime do kapacitnej záťaže, priebeh prevádzky môže vyústiť do prebudenia stroja a následne do vysokého svorkového napätia.

Najnebezpečnejší je takýto jav, ak sa kompenzačným zariadením realizuje dekompenzácia. Zapne sa záložný zdroj napájania, ktorý napája prítomnú kapacitnú záťaž. Počas úvodnej minúty prebieha testovanie stupňov, to znamená, že sa pripájajú kapacitné a induktívne stupne rôznej veľkosti jalového výkonu. Ak sa na (už prebudený) generátor pripne kondenzátor 100kVAr, napätie môže nebezpečne narásť. Pravdepodobne dosiahne hranicu samočinného odpojenia agregátu (v konkrétnom prípade 300V), čo presahuje povolené prepätie niektorých citlivých zariadení. Z toho vyplýva, že automatika musí zabezpečiť stále pripnutie induktívnych prvkov.

V ďalších kapitolách sa záujem obráti na možnosť automatizovania návrhu kompenzačných zariadení. Proces vychádza z teoretickej základne uvedenej v doterajšej časti práce.

## 8 ÚDAJE POSKYTOVANÉ ANALYZÁTOROM SIETE MEG30

V tejto kapitole sa predstaví analyzátor siete, ktorý poskytne informačnú bázu pre automatizovanie návrhu kompenzačnej jednotky. Určia sa základné merané údaje, ako aj spôsoby ich stanovovania. Napokon sa zdôrazní skupina meraných veličín, ktoré môžu byť smerodajné pri návrhovom procese.

Analyzátor siete alebo aj PQ monitor Meg30 je multifunkčný merací prístroj pre meranie a záznam napätí, prúdov, činných, jalových výkonov a energií. Ďalej analyzuje kvalitu napätia predpísanú normou ČSN EN 50160 podľa metód merania kvality elektrickej energie zakotvených v ČSN EN 61000-4-30.

Inštalácia a spustenie merania je užívateľsky jednoduché. Sada PQ monitoru je vybavená okrem samotnej jednotky aj nastaviteľnými prúdovými snímačmi AMOS PQ (30A, 100A, 300A, 1000A) a krokosvorkami pre snímanie napätia. Meranie je ovládané prostredníctvom SW PQ. Komunikácia medzi počítačom a jednotkou je zabezpečená USB káblom. Na úvod je nutné uviesť PQ monitor do stavu *PROVOZ*. Napájanie sa zaháji pripojením stredného vodiča N a potom prvého meracieho napäťového vodiča U1, U2 alebo U3 (analyzátor má svoj akumulátor a v prípade výpadku meraného napätia môže byť funkčný po dobu 1 minúty). Následne je potrebné nastaviť komunikáciu medzi jednotkou a ovládacím programom podľa inštrukcií a môže sa spustiť meranie určených parametrov. Pri meraní je dôležité dohliadať na prípadné preťaženie prúdových transformátorov.



Obr. 8-1: PQ monitor Meg 30 a meracie transformátory prúdu s nastaviteľným rozsahom

## 8.1 Princíp merania a spôsob získavania údajov

Meranie elektrických veličín (4 napätí, 4 prúdov) je založené na základe vzorkovania a následného spracovania hodnôt. PQ monitor pracuje so vzorkovacou frekvenciou 5120Hz, takže frekvenčný rozsah umožňuje meranie do 2555Hz. V naväzujúcich časových oknách s dĺžkami trvania 10 periód (200ms) sa zakaždým navzorkuje 1024 hodnôt.

Veľkosti napätí a prúdov sú dané desaťperiódovými efektívnymi hodnotami. Výpočet prebieha podľa (8.1). Obdobný je výpočet pre efektívnu hodnotu prúdu.

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{1024} \cdot \sum_{l=0}^{1023} u^2(l)} \quad (8.1)$$

K spektrálnej analýze slúži aparát FFT. Navzorkovaných 1024 hodnôt sa transformuje do frekvenčnej oblasti, spočíta sa 51 komplexných harmonických zložiek a 461 medziharmonických komplexných zložiek s krokom 5Hz. Výsledkom je komplexné spektrum prúdu a napätia, ktoré je dané postupnosťami reálnych a imaginárnych častí:  $U_{re}(k)$ ,  $U_{im}(k)$ ,  $I_{re}(k)$ ,  $I_{im}(k)$ , kde  $k$  (poradie spektrálnych zložiek) = 0,1,2,3,...511. Pre základnú harmonickú prislúcha  $k = 10$ .

Z uvedených komplexných spektier sa vypočítajú efektívne hodnoty. Efektívna hodnota základnej harmonickej napätia je uvedená vo vzťahu (8.2). Podobne sa počítajú aj ostatné efektívne hodnoty harmonických a medziharmonických zložiek prúdu a napätia.

$$U_{ef-z} = \sqrt{2 \cdot (U_{re}^2(10) + U_{im}^2(10))} \quad (8.2)$$

Celková efektívna hodnota vrátane všetkých uvažovaných harmonických a medziharmonických je:

$$U_{ef-c} = \sqrt{2 \cdot \sum_{k=0}^{511} (U_{re}^2(k) + U_{im}^2(k))} \quad (8.3)$$

Obdobne sa počíta aj  $I_{ef-c}$ .

Nasleduje spôsob výpočtu celkového harmonického skreslenia. Pre  $THD_U$  v pomerných hodnotách platí nasledovný výpočet:

$$d = \sqrt{\frac{U_{ef-c}^2 - U_{ef-z}^2}{U_{ef-z}^2}} \quad (8.4)$$

Zo vzťahu sa dá usúdiť, že korešponduje so spôsobom výpočtu pre normatívne prostredie ČSN (vzorec 6.3). Pre výpočet prúdov sa prekvapivo uplatňuje normatívne prostredie IEC (8.5, 6.4), keďže sú vyššie harmonické a medziharmonické podelené celkovou efektívnou hodnotou prúdu.

$$d_c = \sqrt{\frac{I_{ef-c}^2 - I_{ef-z}^2}{I_{ef-c}^2}} \quad (8.5)$$

Z komplexných spektier fázových napätí a prúdov sa vyhodnocujú činné a jalové výkony v daných fázach pre relatívnu frekvenciu  $k$ .

Činný výkon:

$$P(k) = 2 \cdot [U_{re}(k) \cdot I_{re}(k) + U_{im}(k) \cdot I_{im}(k)] \quad (8.6)$$

Jalový výkon:

$$Q(k) = 2 \cdot [U_{im}(k) \cdot I_{re}(k) - U_{re}(k) \cdot I_{im}(k)] \quad (8.7)$$

Z dielčich výkonov sa dajú určiť celkové výkony v jednotlivých fázach, celkový trojfázový výkon, energia, účinník.

Spôsob vyhodnotenia ostatných údajov je mimo oblasť záujmu tejto práce.

Je možné skonštatovať, že meracie metódy a presnosť meracích údajov sú v súlade s normou ČSN EN 61000-4-30:2003. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4: Zkušební a měřicí technika – Oddíl 30: Metody měření kvality elektrické.*

## 8.2 Meracie funkcie Meg 30

### § Funkcia záznamníku

V tejto funkcii sa zaznamenávajú priemerné efektívne hodnoty všetkých prúdov, napätí, činných a jalových výkonov pre zvolené časové okno (minimálny krok je 1s). SW následne vypočíta energie a skutočné účinníky.

### § Funkcia kvality napätia

Ide o záznam desaťminútových údajov v súlade s normou ČSN EN 50160 s dodatkovými informáciami o prúdoch. K dispozícii sú nasledovné údaje.

- + priemerné frekvencie, maximálne a minimálne 10s frekvencie odvodené z  $U_1$
- + počet prekročení desaťsekundových hodnôt frekvencie pri definovaných medziach
- + hodnoty nesymetrií
- + priemerné hodnoty napätí a prúdov, minimálne a maximálne hodnoty napätí z 0,2s okien
- + priemerné hodnoty všetkých 50 harmonických zložiek napätí  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  a päť vybraných harmonických zložiek prúdu  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$
- + hodnoty flikru  $P_{st}$  a  $Plt$  pre  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$
- + veľkosť THD  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  a  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$
- + súhrnná doba poklesu, prerušenia a prekročení napätí  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$

§ Funkcia záznamu udalostí, ktorá umožňuje detailnú analýzu priebehu udalosti napätia s rozlíšením na 10ms.

§ Funkcia osciloskopického merania. Služi prevažne ku kontrole správneho zapojenia meracej sústavy.

*Uvedené informácie sú čerpané z katalógových listov firmy MEG A a.s.[28]*

### 8.3 Údaje spracovateľné pre návrh kompenzácie

Pre potreby návrhu kompenzácie sú užitočné nasledovné informácie :

a) Zo záznamníku:

- i. Maximálny trojfázový jalový výkon vývodu za merané obdobie  $Q_{\max\_3f}$  (VAr)
- ii. Priemerný trojfázový činný výkon  $P_{AV\_3f}$  (W) vývodu za merané obdobie
- iii. Spotrebovaná trojfázová činná energia  $E_P$  (kWh) za merané obdobie
- iv. Spotrebovaná trojfázová jalová induktívna energia  $E_{QL}$  (kVArh) za merané obdobie
- v. Jalová trojfázová kapacitná dodávka  $E_{QC}$  (kVArh) za sledované obdobie

Ďalej sa údajová báza rozvinie o účinník počítaný podľa (8.9).

$$\cos j = \cos \left[ \arctan \left( \frac{E_{QL}}{E_P} \right) \right] \quad (8.9)$$

b) Z databázy hodnôt pre kvalitu napätia

- i. Maximálne desaťminútové celkové skreslenie napätia  $THD_U$  v jednotlivých fázach. Pre potreby návrhu sa vyberie maximálna hodnota spomedzi jednotlivých fáz. Označí sa  $THD_{U\_max}$ .
- ii. Maximálne desaťminútové hodnoty harmonických zložiek napätia  $U_{h\_i}$  (medziharmonické nie sú k dispozícii) v jednotlivých fázach. Pre potreby návrhu sa opäť vyberie maximálna hodnota spomedzi jednotlivých fáz. Označí sa  $U_{h\_max}$ .

Uvedené veličiny sú z hľadiska vierohodného reflektovania skutočných hodnôt použiteľné pre návrh kompenzácie účinníku.

Pre potreby návrhu by prospela maximálna hodnota váženého celkového harmonického skreslenia  $THD_{U(V)\_max}$  za sledované obdobie. Taktiež by pozitívne zaúčinkovali skrátenia časových okien, pre ktoré sa vyhodnocujú maximá z desiatich minút na 0,2s.

Na hodnotenie nutnosti dekompenzačného členu by bola žiadaná veličina *Maximálny trojfázový kapacitný jalový výkon vývodu za merané obdobie*  $Q_{\max C\_3f}$  (VAr). Je to podobná veličina, ako maximálny jalový výkon, ale táto hodnota by reflektovala stav, keď celý vývod produkuje jalovú dodávku.

## 9 ALGORITMUS NÁVRHU KOMPENZAČNEJ JEDNOTKY

Základňa pre automatizovanie návrhu kompenzačnej jednotky je vytvorená prostredníctvom analyzátoru siete MEG30. Dostupné a užitočné údaje, ako aj spôsoby ich vyhodnocovania boli predstavené v minulej kapitole.

Výsledky z analyzátoru siete sú čiastočne spracované a vyobrazené v príslušnom sw (PQ monitor). Predpokladá sa preto, že uvažovaný sw bude obsahovať prídavný modul s názvom *Kompenzácia cos φ*, v ktorom bude vedená komunikácia s užívateľom pri návrhu kompenzácie účinníku.

1. Samotný algoritmus je zahájený meraním v časovom okne, ktoré by malo byť z hľadiska objektivity dostatočne dlhé na to, aby pokrylo všetky prevádzkové stavy odberného miesta. Minimálny čas merania sa stanoví na 24 hodín. Pri kratších meraniach sa zobrazí hlásenie: *„Meranie by malo prebehnúť v takej dĺžke, aby zachytilo všetky systémové stavy“*. Je to len informatívne okno a nezabráni ďalším návrhovým krokom.

2. Vyhodnotí sa účinník pre sledované časové okno podľa vzťahu (8.9). K tomu poslúži činná a jalová práca, ktorá sa spotrebuje počas meranej doby. Ak je vypočítaný účinník v koridore  $1 - 0,95$ , tak sa objaví hlásenie: *„Účinník odberu je vyhovujúci, nie je potrebná dodatočná kompenzácia“* a celý algoritmus sa ukončí. V opačnom prípade sa objaví hlásenie: *„Je potrebná kompenzácia účinníku odberu podľa nasledovných parametrov“*.

3. Po určení opodstatnenosti kompenzácie sa určí potrebný trojfázový jalový výkon kompenzačného zariadenia  $Q_K$  podľa maximálneho trojfázového jalového výkonu za sledované obdobie  $Q_{\max\_3f}$ . Táto hodnota sa navýši o 25% (9.1), aby bola zahrnutá jednak rezerva v rámci rozširovania spotreby, na druhej strane sa prihliada na možný pokles kapacitného výkonu v dôsledku starnutia kondenzátorov alebo poklesu napätia. Inštalovaný výkon kompenzačného zariadenia je

$$Q_k = Q_{\max\_3f} \cdot 1,25(\text{VAr}) \quad (9.1)$$

4. Návrh počíta s aplikáciou analyzátoru siete najmä v bode merania energetickej spoločnosti, a teda s prevedením centrálnej kompenzácie (teoreticky skupinovej kompenzácie navrhutej a umiestnenej na podružnom rozvážači). Dôvodom je väčší počet spotrebičov napojených na hlavný alebo podružný rozvážač, z čoho vyplýva široké spektrum okamžitých hodnôt odoberaného jalového výkonu a teda možnosť zanedbania riešenia individuálnej kompenzácie. S prihliadnutím na takmer výhradný podiel stupňovitých centrálnych (skupinových) kompenzácií sa návrh upriami práve na tento typ rozvážača. Pre daný účel sa musia určiť výkony jednotlivých kompenzačných stupňov.

Aby sa zabezpečila dostatočná citlivosť, najjemnejší kompenzačný stupeň musí byť schopný spôsobiť zmenu  $\cos \varphi$  o 0,01 najmä v oblasti účinníku 0,95 – 1. Z tab. 9-1 sa dá vidieť, že rozdiel tangenty uhlov pre  $\cos \varphi$  rozdielne o 0,01 je zhruba 0,05 v pásme 0,95 – 0,99. Pri nižšie pásmo účinníka je rozdiel tangenty uhlov ešte menší. Presne by sa vývoj dal vypočítať pomocou derivácie funkcie tangens.

Tab. 9-1 Hodnoty goniometrických funkcií

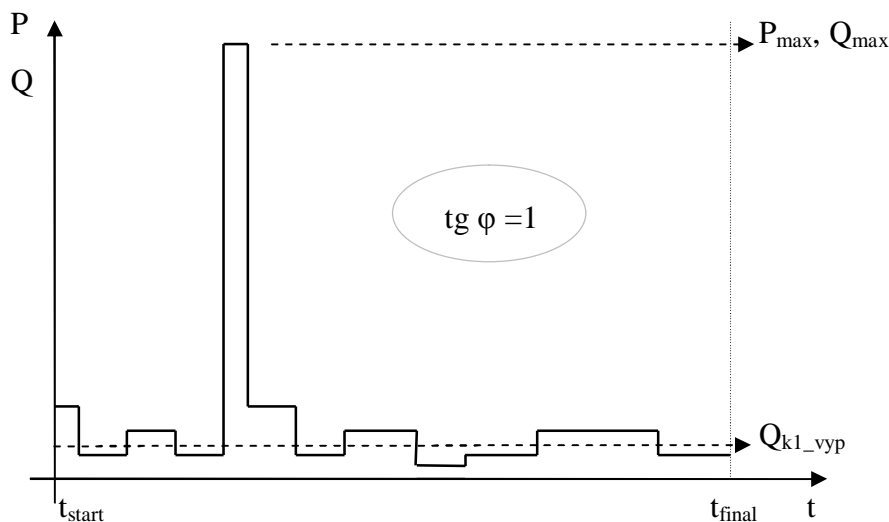
cos $\varphi$	( - )	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95
tg $\varphi$	( - )	0	0,142	0,203	0,25	0,291	0,328

cos $\varphi$	( - )	0,8	0,79	0,78	...	0,65	0,64
tg $\varphi$	( - )	0,75	0,77	0,802	...	1,169	1,2

Keďže je tangens pre výkony definovaný ako pomer jalového výkonu Q k činnému výkonu P, dá sa usúdiť, že jalový výkon prvého stupňa vypočítaný podľa (9.2) bude schopný spôsobiť zmeny okamžitého účinníka o hodnotu približnú 0,01 v pásme 0,95 -0,99. To je dostatočná citlivosť prvého kompenzačného stupňa.

$$Q_{k1\_vyp} = 0,05 \cdot P_{AV\_3f} \quad (\text{VAr}) \quad (9.2)$$

Je namieste otázka dôvodu výberu  $P_{AV\_3f}$  ako etalonu. Pomocný môže byť v tomto smere (obr. 9-1).



Obr. 9-1: Priebeh činného / jalového výkonu ( $tg \varphi = 1$ ) pre odmerané časové okno

Na obr. 9-1 je naznačený priebeh jalového a činného výkonu jednou charakteristikou pri predpoklade  $tg \varphi = 1$ .

Ak by sa za základ zvolil maximálny odmeraný činný výkon  $P_{max}$ , pri kompenzácii v čase  $P \neq P_{max}$  (väčšina časového úseku charakteristiky 9-1) by najnižší kompenzačný stupeň  $Q_{k1\_vyp} = 0,05 \cdot P_{max}$  nebol na úrovni požadovanej citlivosti. V určitých okamihoch by musel byť



odopnutý, aby nespôsobil prekompenzovanie, pričom by dlhodobé prevádzkovanie v takomto režime viedlo k penalizačným nákladom. Preto poskytuje priemerná hodnota činného výkonu  $P_{AV\_3f}$  reálnejší základ pre voľbu prvého stupňa s požadovanou citlivosťou.

Výber menovitého jalového výkonu jednotlivých kompenzačných stupňov bude podliehať databázovým údajom v *Tab. 9-2*, ktoré sú prispôbené ponuke výrobcu kondenzátorov. Voľba prvého stupňa padne na kondenzátor s rovnakou alebo najbližšou vyššou hodnotou jalového výkonu v porovnaní s  $Q_{K1\_vyp}$ .

*Tab. 9-2 Databázové skupiny stupňovitej kompenzácie*

A		1	2	4	8	15	30	50	50	50	100
B	(kVAr)	1,5	3,15	6,25	12,5	25	50	50	50	100	
C		2,5	5	10	20	40	50	50	50	100	

Postupnosť kompenzačných stupňov podľa jalových výkonov bude podliehať tej skupine, do ktorej patrí jalový výkon prvého stupňa. Kopíruje sa približne pravidlo 1:2:4:8,.. až po 50kVAr. Druhý stupeň bude teda nasledovať za prvým stupňom s približne dvojnásobným výkonom v príslušnej databázovej skupine. Nasledujú tri výkony 50kVAr a napokon stupeň s najvyšším výkonom 100kVAr. Za každým pripočítaným stupňom sa vykoná súčet a preverí sa, či je možné pridať ďalší dvojnásobný stupeň. Ak sa dosiahne hladina 100kVAr, opakuje sa ponuka 100kVAr aj pre ďalšie stupne. Cyklus pokračuje, až kým kontrolný súčet s nasledovným potenciálnym stupňom neprekročí hranicu požadovaného jalového výkonu. V tom prípade je potrebné nájsť z **celej** databázy kondenzátor, ktorého jalový výkon spôsobí dorovnanie alebo najmenšie prekročenie  $Q_{max}$ . Výkon posledného stupňa nesmie byť pritom menší ako výkon prvého najmenšieho stupňa. Môže sa mu rovnať.

Príklad môže byť nasledovný:  $Q_{max\_3f} = 250\text{kVAr}$ ,  $P_{AV\_3f} = 395\text{kW}$ .

$$Q_K = 1,25 \cdot Q_{max\_3f} = 1,25 \cdot 250 = 312,5\text{kVAr}$$

$$Q_{K1\_vyp} = 0,05 \cdot P_{AV\_3f} = 0,05 \cdot 395 = 19,75\text{kVAr}$$

Potom sú jednotlivé stupne nasledovné:

$$Q_{1K} = 20\text{kVAr} \text{ (najbližšia vyššia hodnota v postupnosti „C“ skupina)}$$

$$Q_{2K} = 40\text{kVAr} \text{ (postupnosť „C“ skupina)}$$

$$Q_{3K} = 50\text{kVAr}$$

$$Q_{4K} = 50\text{kVAr}$$

$$Q_{5K} = 50\text{kVAr}$$

$$Q_{6K} = 100\text{kVAr}$$

$$Q_{7K} = 20\text{kVAr} \text{ (minimálne prekročenie } Q_K \text{ výkonom, ktorý nesmie byť menší ako výkon prvého stupňa).}$$

5. V piatom kroku návrhu je potrebné ošetriť kompenzáciu z hľadiska harmonického skreslenia. Prístup bude spočívať v rozhodnutí o opodstatnenosti chránenej kompenzácie (nie vo filtrácii vyšších harmonických).

V stati zaoberajúcou sa rezonančným správaním kondenzátorov boli uvedené prostriedky, ktoré umožňujú stanoviť rezonančné body pre danú konfiguráciu siete s kompenzačnou jednotkou. Výpočty boli založené na poznaní kapacitného výkonu kompenzačnej jednotky. Pri stupňovitej kompenzácii sa tento postup nedá aplikovať, pretože spínaním jednotlivých stupňov dochádza k neustálym zmenám rezonančnej frekvencie. Nehovoriac o spínacích akciách pri rekonfiguráciách siete, ktoré menia skratový výkon v mieste pripojenia. Je teda možné vyhlásiť, presné numerické stanovenie vplyvu kvality napätia na stupňovitú kompenzačnú jednotku sa nedá previesť.

Bližší pohľad na namáhanie kondenzátorov je však poskytnutý vedomosťou o maximálnom celkovom harmonickom skreslení napätia  $THD_{U_{max}}$  alebo v lepšom prípade maximálnom váženom celkovom harmonickom skreslení napätia  $THD_{U(V)_{max}}$  v stave bez kompenzácie. Je zjavné, že pripojenie kondenzátorov zmení harmonické skreslenie a teda aj hodnoty  $THD_{U_m}$ ,  $THD_{U(V)_{max}}$ , ale tieto údaje je možné využiť pre informáciu o miere rizika, ktoré bude sprevádzať prevádzku kondenzátora.

Kvantitatívne vyjadrená podmienka pre realizáciu chránenej kompenzácie je nasledovná. Pri hodnotách  $THD_{U_{max}} > 3,5\%$  alebo  $THD_{U(V)_{max}} > 130\%$  (ekvivalentné 1,3 násobnému prúdovému preťaženiu) je potrebná chránená kompenzácia. Na splnenie podmienky je postačujúce dovŕšiť aspoň jeden z parametrov. Pri  $THD_{U(V)_{max}} < 130\%$  a  $2\% < THD_{U_{max}} < 3,5\%$  je postačujúce použiť kondenzátor s vyššou menovitou hodnotou  $U_N = 440V$ . Limitné údaje sú odvodené z katalógových listov výrobcu kondenzátorov [25]. Pri zvýšenom menovitom napätí kondenzátora síce dôjde k poklesu dodávaného jalového výkonu (reálne je pripojený len na 400V), ale 25% rezervný inštalovaný jalový výkon pokryje aj túto stratu.

Uvedené podmienky sa vystužia ešte ďalšou. Ak je podiel nelineárnych spotrebičov  $> 10\%$  z menovitého výkonu transformátora  $S_T$ , je nutná chránená kompenzácia. Na tento fakt sa opýta dialógové okno, pričom užívateľ bude mať na výber tri možnosti: 1.: „viac ako 10% z  $S_T$ “, 2.: „menej ako 10% z  $S_T$ “, 3.: „nemám prehľad“. Pri tretej odpovedi nebude tento faktor zahrnutý do rozhodovacieho procesu.

Tabuľka 9-3 sumarizuje uvedené podmienky.

Pri voľbe chránenej kompenzácie je nutné zvoliť rezonančnú frekvenciu.

Tab. 9-3 Rozhodnutie o chránení kompenzácie

THD <sub>U_max</sub> > 3,5%	Chránená kompenzácia
U (alebo)	
THD <sub>U(V)_max</sub> > 130%	
U	
podiel nelineárnych spotrebičov > 10% z S <sub>T</sub>	
2% < THD <sub>U_max</sub> < 3,5%	Kondenzátory s menovitou hodnotou napätia 440V
∩ (a zároveň)	
THD <sub>U(V)_max</sub> < 130%	
∩	
podiel nelineárnych spotrebičov < 10% z S <sub>T</sub>	
THD <sub>U_max</sub> < 3,5%	Prosté kondenzátory
∩	
THD <sub>U(V)_max</sub> < 130%	
∩	
podiel nelineárnych spotrebičov < 10% z S <sub>T</sub>	

Pri voľbe rezonančnej frekvencie je potrebné mať informáciu o frekvencii HDO. Cestou k nej je opäť dialógové okno, na ktoré užívateľ musí odpovedať. Ako vhodná pomoc sa pri tejto otázke ponúka výber regiónu, na základe ktorého sa priradí konkrétna frekvencia. To znamená, že program bude mať databázu frekvencií HDO pre každý kraj. V Českej republike a na Slovensku je HDO signál prenášaný na frekvencii 183Hz a 216,66Hz.

Ako potenciálne rezonančné frekvencie chránených kompenzácií sa ponúkajú 189Hz, 134Hz a 204Hz (typizované tlmivky).

V tejto fáze je dôležité rozhodnúť, či je tretia harmonická zložka napätia dostatočne intenzívna na to, aby musela byť v chránenej oblasti. Ak je maximálna hodnota tretej harmonickej  $U_{3\_max}$  vyššia ako 0,3 násobok  $U_{5\_max}$ , potom sa rezonančná frekvencia umiestni do frekvencie 134Hz (14%). V opačnom prípade sa zvolí frekvencia podľa signálu HDO. Ak je signál HDO vysielaný na 183Hz, zvolí sa rezonančná frekvencia chráneného kompenzačného stupňa na 204Hz (6%). V prípade HDO 216,66Hz sa zvolí rezonančná frekvencia na úrovni 189Hz (7%).

6. Ďalšou otázkou je opodstatnenosť dekompenzačného stupňa. Ak je pre sledované obdobie hodnota celkovej jalovej dodávky vývodu  $E_{QC}$  nad úrovňou 5% z celkovej trojfázovej činnnej energie  $E_p$ , tak je nutné vybaviť kompenzáciu aj dekompenzačným stupňom. Jej hodnotou bude maximálny trojfázový jalový kapacitný výkon zo všetkých výkonových vzoriek so značením  $Q_{L1} = Q_{maxC\_3f}$ .

7. Návrhový algoritmus upozorní na možnosť realizácie rýchlej kompenzácie. “V prípade dynamických zmien jalového výkonu (pod 2s), je možná realizácia rýchlej kompenzácie – bezkontaktného spínania kondenzátorov.”

### RESUMÉ:

Analyzátor siete poskytne nasledovné údaje:

- >  $t_{MER}$  (hh:mm:ss) – Doba merania
- >  $Q_{max\_3f}$  (VAr) – Maximálny trojfázový jalový výkon vývodu
- >  $P_{AV\_3f}$  (W) – Priemerný trojfázový činný výkon za merané obdobie
- >  $E_P$  (kWh) – Spotrebovaná trojfázová činná energia  $E_P$  za merané obdobie
- >  $E_{QL}$  (kVArh) – Spotrebovaná trojfázová jalová induktívna energia  $E_{QL}$
- >  $E_{QC}$  (kVArh) – Spotrebovaná trojfázová jalová kapacitívna energia  $E_{QC}$
- >  $THD_{U\_max}$  (%) – Maximálne celkové harmonické skreslenie napätia
- >  $THD_{U(V)\_max}$  (%) – Max. vážené celkové harmonické skreslenie napätia
- >  $U_{3\_max}$  (%) – Maximálna relatívna amplitúda tretej harmonickej napätia
- >  $U_{5\_max}$  (%) – Maximálna relatívna amplitúda piatej harmonickej napätia
- >  $Q_{maxC\_3f}$  (VAr) – Maximálny trojfázový kapacitný jalový výkon vývodu

Prostredníctvom dialógového okna sa bude SW pýtať na:

- Podiel nelineárnych spotrebičov
- Frekvenciu prenosu HDO (región)
- Požadovanú rýchlosť kompenzácie

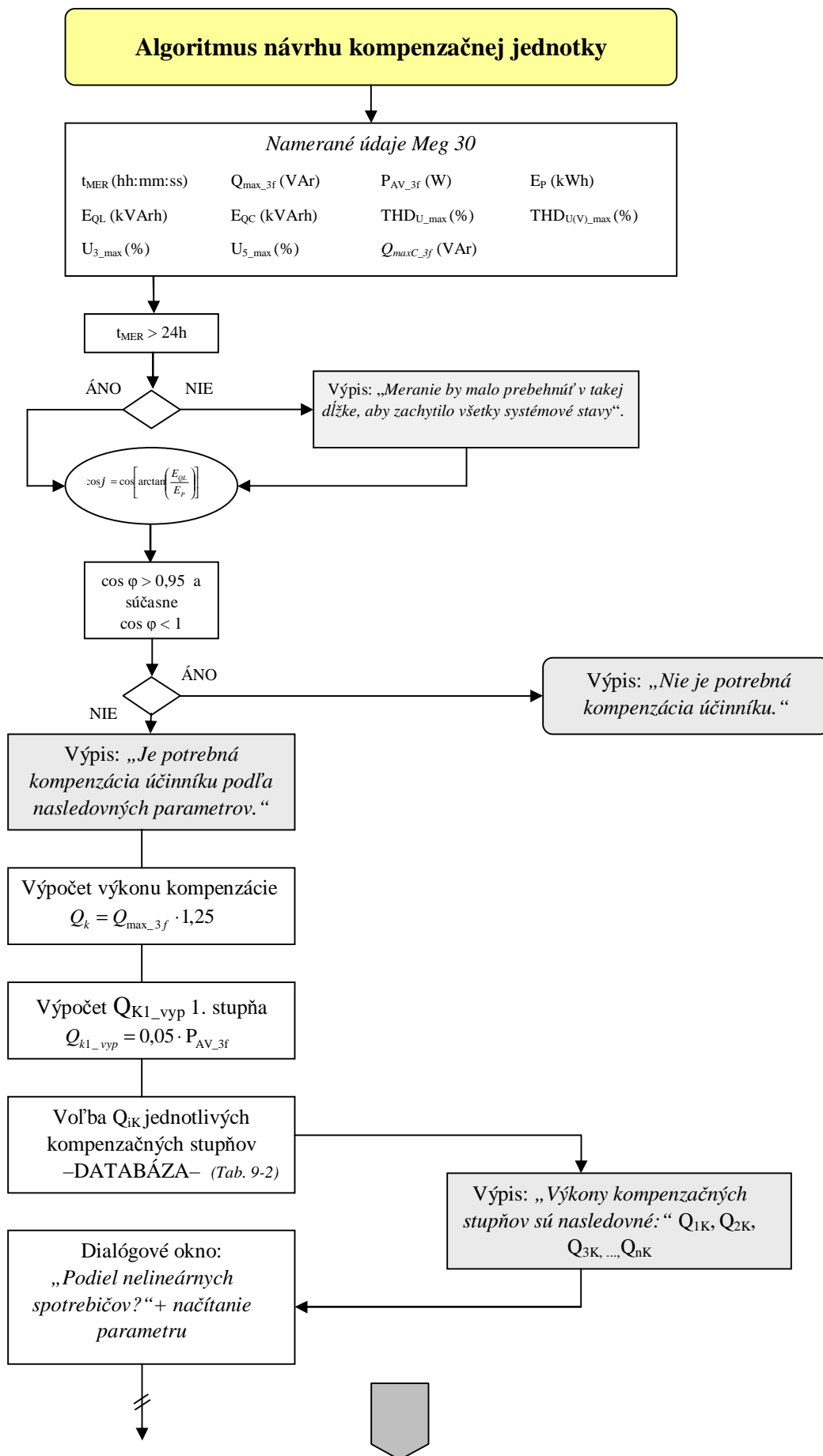
Výsledkom bude výpis charakteristických údajov na obrazovku:

ú Doba merania

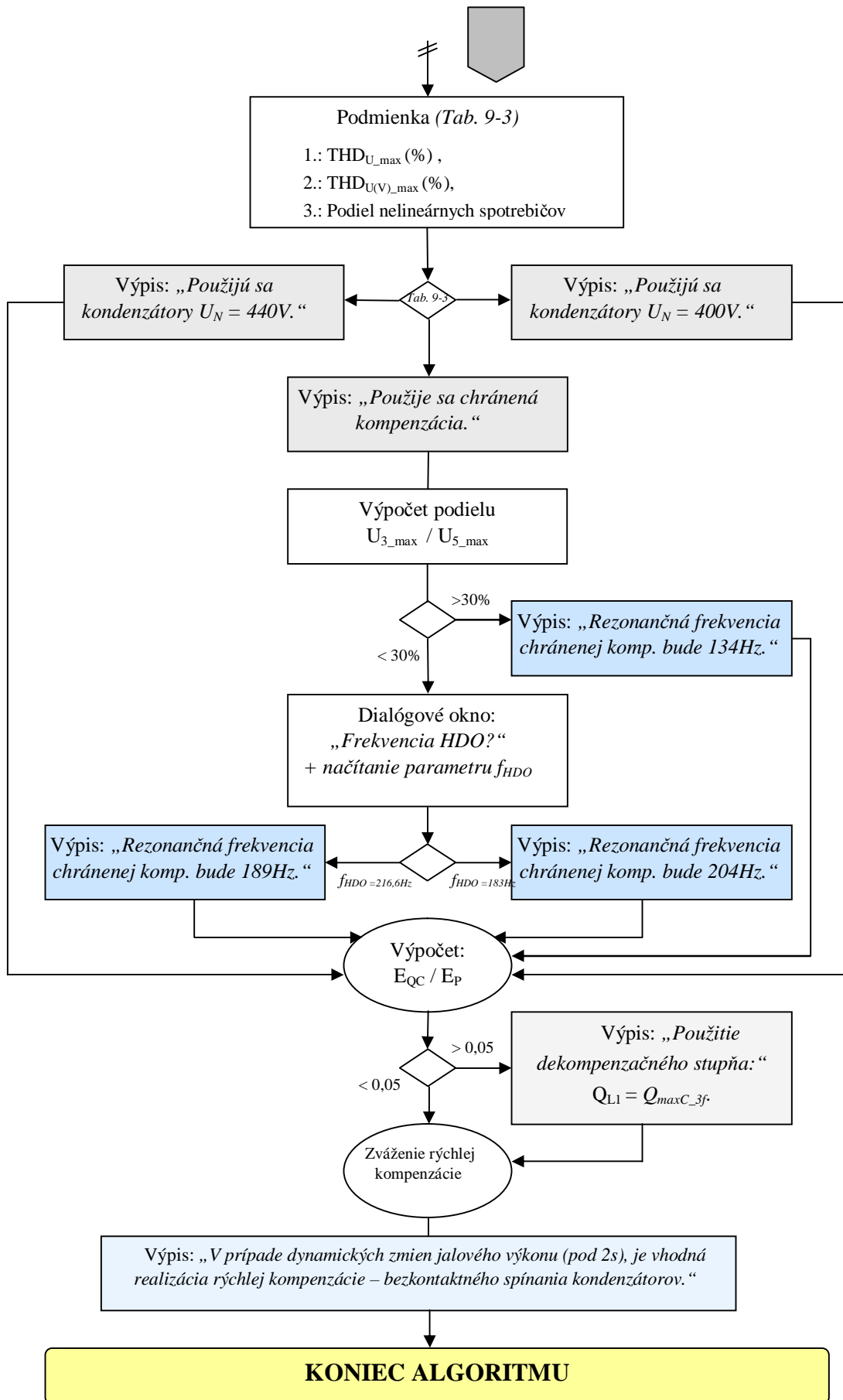
ú Kompenzácia

- nepotrebná
- potrebná
  - § celkový kompenzačný výkon  $Q_K$
  - § počet stupňov
  - § výkony jednotlivých stupňov  $Q_{iK}$
  - § riešenie kompenzačných stupňov
    - > kondenzátory  $U_N = 400V$
    - > kondenzátory  $U_N = 440V$
    - > chránená kompenzácia
      - frekvencia HDO
      - rezonančná frekvencia
  - § rýchla kompenzácia
    - > nie
    - > áno
  - § potreba dekompenzačného členu
    - > nie
    - > áno
      - jalový výkon dekompenzačného stupňa  $Q_{L1}$

Vývojový diagram pre opísaný algoritmus je zobrazený na nasledujúcich stranách.



Obr. 9-2: Vývojový diagram ( 1 / 2 )



Obr. 9-3: Vývojový diagram ( 2 / 2 )

## 10 TESTOVANIE

Úlohou tejto state je na základe odmeraných údajov z rozdielnych odberných miest navrhnúť spôsob kompenzácie podľa algoritmu a porovnať ho so skutočnosťou.

Je dôležité podotknúť, že algoritmus počíta s prítomnosťou skupiny údajov, ktoré zatiaľ nepatria medzi bežne zobrazované veličiny. Vzhľadom na možnosti analyzátoru siete sa predpokladá, že by rozšírenie poskytovaných informácií o  $Q_{maxC\_3f}$  (VAr),  $THD_{U(V)\_max}$  (%) malo byť jednoducho realizovateľné.

Pre testovanie v tejto fáze nebudú spomenuté veličiny uvažované.


### 10.1 Meranie verejnej napájacej siete

Prostredníctvom prvého merania bol snímaný vývod z transformátora, ktorý napája skupinu maloobderateľov vo verejnej napájacej sieti.

Boli zaznamenané nasledovné údaje:

- >  $t_{MER} = 0h:11m:33s$
- >  $Q_{max\_3f} = 56,14kVAr$  (pozn.: priemerný  $Q_{3f} = 13,3kVAr$ )
- >  $P_{AV\_3f} = 60,29kW$
- >  $E_P = 11,529kWh$
- >  $E_{QL} = 2,567kVArh$
- >  $E_{QC} = 0,399kVArh$

Ostatné údaje nemajú opodstatnenie, ako to vyplynie z výpočtu účinníku za sledované obdobie. V prvom kroku návrhu by systém mal upozorniť na dôležitosť dĺžky trvania merania. Nasleduje výpočet  $\cos \varphi$  podľa vzťahu 8.9. Pre tento prípad dosiahlo odberné miesto účinník s hodnotou 0,976. To znamená, že by sa podľa algoritmu objavilo hlásenie referujúce o nepotrebnosti kompenzácie. V skutočnosti naozaj nie je prevedená kompenzácia.

Energie-Tabulka									PO MEg 30
	Mäzev:	home			V.č.: 345	Měření č.:	Měřil:		
	Soubor:	C:\Program ...Q1\data\home.PQ1			Měřeno:	Od 23.4.2010 do 23.4.2010			test
	Poznámka:							Firma:	MEGA
									1/1
Datum-čas	EP L1	EP L2	EP L3	EP	EQL L1	EQL L2	EQL L3	EQL	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kVArh]	[kVArh]	[kVArh]	[kVArh]	
23.04. 12:29 - 12:30	-0,236	0,375	-0,079	0,059	0,000	0,094	0,279	0,373	
<b>23.04. 12:30 - 12:40</b>	3,677	4,604	3,248	<b>11,529</b>	0,677	0,926	0,964	<b>2,567</b>	
<b>Celkem 22.4.2010</b>	3,441	4,979	3,169	11,589	0,677	1,020	1,243	2,940	
<b>Celkem</b>	3,441	4,979	3,169	11,589	0,677	1,020	1,243	2,940	

Obr. 10-1: Detail energie záznamníku

## 10.2 Meranie v priemyselnom podniku

Druhé testovacie meranie bolo prevedené v podružnom rozvádzači priemyselného závodu. Na tento rozvádzač je inštalovaná kompenzačná jednotka. V miestnej technológii je prítomné lisovanie a zváranie. Po dobu merania bola jestvujúca kompenzácia účelne vo vypnutom stave. Namerali sa nasledovné údaje.

> $t_{MER}$	= 00:12:27
> $Q_{max\_3f}$	= 96,13 kVAr
> $P_{AV\_3f}$	= 194,52 kW
> $E_P$	= 40,362kWh
> $E_{QL}$	= 15,749kVArh
> $E_{QC}$	= 0,02kVArh
> $THD_{U\_max}$	= 1,59%
> $THD_{U(V)\_max}$	= nie je definované (ND)
> $U_{3\_max}$	= 0,80%
> $U_{5\_max}$	= 1,15%
> $Q_{maxC\_3f}$	= ND

Návrhový proces podľa algoritmu by bol nasledovný. Ako prvé by sa objavilo upozorňujúce hlásenie o dĺžke trvania merania. Ďalej sa počíta účinník, ktorý v tomto prípade vychádza na 0,932. Objavuje sa hlásenie: „*Je potrebná kompenzácia účinníku odberu podľa nasledovných parametrov*“. Vypočíta sa výkon kompenzácie na  $Q_K = 96,13 \cdot 1,25 = 120,1625\text{kVAr}$ . Vypočítaný výkon prvého stupňa je  $Q_{K1\_vyp} = 0,05 \cdot P_{AV\_3f} = 0,05 \cdot 194,52 = 9,726\text{kVAr}$ .

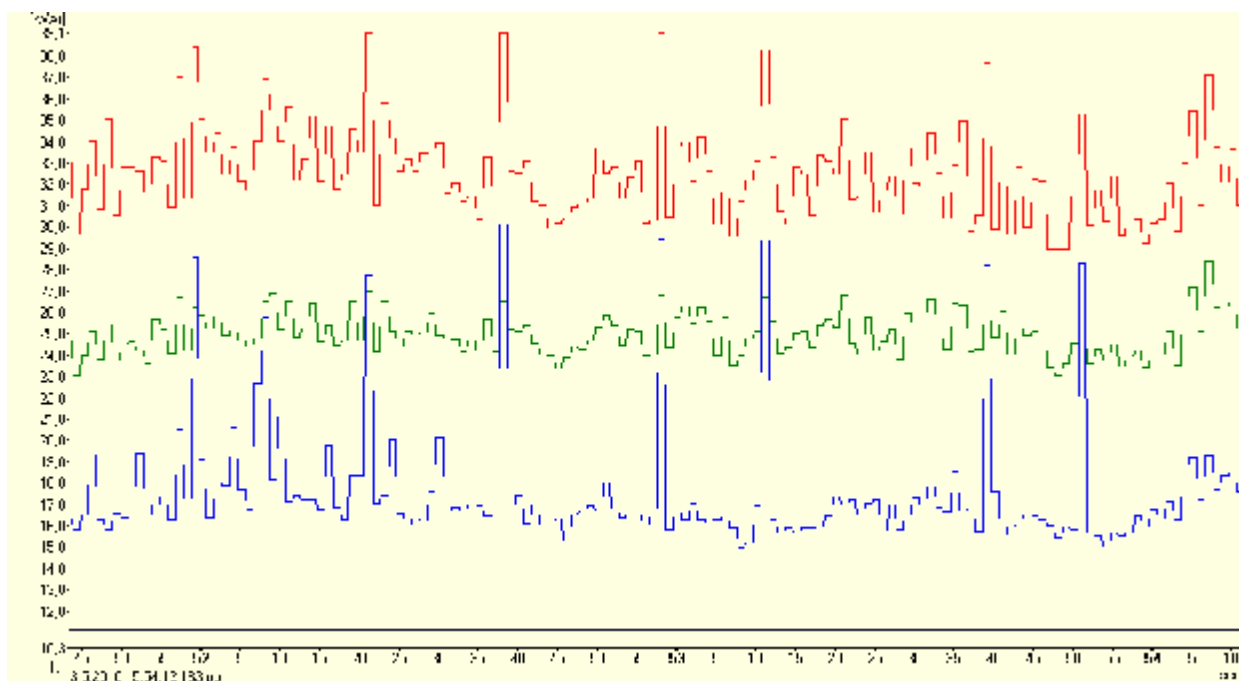
Vyberá sa z databázy najbližší vyšší stupeň, t.j. 10kVAr. Postupuje sa po ďalších stupňoch v databázovej skupine C. Za každým pripojeným stupňom sa vykoná kontrolný súčet o priraditeľnosti ďalšieho stupňa. Po pripojení štvrtého stupňa v zložení 10-20-40-50kVAr systém zistil, že ďalší 50kVAr člen by už prevýšil požadovaný jalový výkon. Preto nájde z databázy taký kondenzátor, ktorého menovitý výkon nie je nižší ako výkon prvého stupňa a pritom spôsobí najmenšie prekročenie  $Q_K$ .

Potom sú jednotlivé stupne nasledovné:

- $Q_{1K} = 10\text{kVAr}$  (najbližšia vyššia hodnota v postupnosti „C“ skupina)
- $Q_{2K} = 20\text{kVAr}$  (postupnosť „C“ skupina)
- $Q_{3K} = 40\text{kVAr}$
- $Q_{4K} = 50\text{kVAr}$
- $Q_{5K} = 10\text{kVAr}$  (minimálne prekročenie  $Q_K$  výkonom, ktorý nesmie byť menší ako výkon prvého stupňa).



Dialógové okno sa následne pýta na podiel nelineárnych spotrebičov z výkonu napájacieho transformátora. Zvolí sa možnosť: „Bližšie neurčené“, čo reflektuje reálnu situáciu. Nasleduje vyhodnotenie podmienok pre realizáciu chránenej kompenzácie. Po zohľadnení faktorov sa objavuje hlásenie: „Použijú sa kondenzátory  $U_N = 400V$ “. Po výpočte sa zistí, že dekompenzačný člen nie je potrebný, algoritmus sa uzatvorí upozornením na možnosť rýchlej kompenzácie. Z priebehov fázových jalových výkonov na obr. 10-2 sa dá usúdiť, že dynamika zmien trojfázového jalového výkonu je na hranici rozhodnutia o rýchlej kompenzácii. Avšak najmä prítomnosť zväračiek predurčuje bezkontaktné spínanie za výhodné. Predíde sa penalizačným nákladom a zvýši sa životnosť kondenzátorov.



Obr. 10-2: Priebehy jalových výkonov

Skutočnosť je nasledovná. Inštalovaný výkon kompenzačného zariadenia je 175kVAr. Kompenzácia je chránená s činiteľom zatlmenia 7% a nie je použitá rýchla kompenzácia.

Pre merané časové okno je však možné vyhlásiť, že inštalovaný výkon 130kVAr a nechránená kompenzácia vyhovujú prevádzkovým parametrom.

## 11 ZÁVER

Diplomová práca nasledovala cieľ nájsť expertný systém, ktorý bude schopný navrhovať kompenzačné jednotky pri uvážení parametrov odberného miesta. Pre účel zaistenia dostatočného kvanta informácií bol vybraný analyzátor siete MEG 30.

Práca sa k finálnej podobe automatizovaného návrhu vinie cez hlboké bádanie problematiky kompenzácie účinníka na hladine nn. Teoretické základy sú objasnené pri uvažovaní lineárneho elektromagnetického prostredia. Bolo podotknuté, že technológia kompenzácie je dobre zvládnutá, avšak stále intenzívnejšie sa vynára otázka prevádzkovania kompenzačnej jednotky v prostredí so zvýšeným výskytom harmonických a medziharmonických zložiek. Pojednali sa tri procesy poškodzovania kondenzátorov, so zvláštnym dôrazom na rezonančné pochody.

V ďalšej časti práce boli predstreté možnosti technickej realizácie účinníka s prízvukom na objasnenie rozhodovacieho procesu, ktorý typ kompenzácie je za daných podmienok vhodný. Rozsudok je utváraný na základe kvantifikovateľných veličín tak, aby sa daný algoritmus rozhodnutia dal premietnuť do automatizovaného návrhu.

Práca napokon ústi až k vývojovému diagramu expertného systému, ktorý najprv rieši otázku výkonového zabezpečenia kompenzačného rozvádzača, neskôr sa dostáva k otázke intenzity harmonického skreslenia v mieste budúceho pripojenia kompenzácie. Chránená kompenzácia je navrhnutá, ak je splnená aspoň jedna z troch podmienok, konkrétne miera celkového harmonického skreslenia, váženého celkového harmonického skreslenia a podiel nelineárnych spotrebičov z výkonu napájacieho transformátoru.

Následne sa uváži potreba dekompenzačného stupňa. Existujú totiž prevádzky, kde prirodzená kapacitná dodávka môže prevýšiť jej induktívnu spotrebu, za čo taktiež prislúchajú penalizačné náklady vzťahované k dodanej jalovej energii. Dekompenzačný stupeň sa navrhuje s výkonom, ktorý je maximálnym trojfázovým jalovým kapacitným výkonom za sledované časové okno. Analyzátor siete by pre potreby návrhu bolo vhodné doplniť o túto vedomosť, ako aj o informáciu váženého celkového harmonického skreslenia napätia.

Na záver patrí pranie, aby si tento alternatívny návrh kompenzácie našiel uplatnenie aspoň ako informačná výpomoc pri projektovaní kompenzačných zariadení. Pri uvážení hotových údajov, ktoré poskytuje analyzátor siete Meg 30 a náročnosti vývojového diagramu sa dá usúdiť, že by prídavný modul *Kompenzácia v SW PQ monitor* zatriktívnil produkt MEG 30 pre odborne angažovanú verejnosť pri relatívne nenáročnom príspevení SW vývojového tímu.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] AKAGI, H., Watanabe, E.H., Aredes, M.: *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, IEEE Press, New Jersey, 2007
- [2] ARRILAGA, J., WATSON, N.R.: *Power System Harmonics*. WILEY, Chichester (UK), 2003
- [3] BLAŽEK, V., *Distribuce elektrické energie*. Scriptum. VUT, Brno, 2007
- [4] BOLLEN, M.H.J., *Understanding Power Quality Problems. Voltage sags and interruptions*. IEEE Press Series on Power Engineering, New York, 2000
- [5] BOLLEN, M.H.J.; GU, I.Y.H., *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. IEEE Press Series on Power Engineering, New York, 2006
- [6] DÁN, A., SANTARIUS, P., GAVLAS, J., KUŽELA, M.: *Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí*. International Copper Association, Hungarian Copper Promotion Centre - Budapešť, 2000, 47 stran
- [7] DE KEULENAER, H.: *Introduction Power Quality Self-assessment Guide* [on line] (11.04.2009), Copper Development Association Publication. <http://www.leonardo-energy.org/files/2006/1.2%20Power%20Quality%20Self-assessment.pdf?download>
- [8] DRÁPELA, J.: *Měření impedance*. [on line] (13.10.2009) Prezentáční materiál kurzu MPQ1. UEEN FEKT VUT Brno. <https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/86984/Doplky/Impedance.pdf>
- [9] DRÁPELA, J.: *Výkony v třífázových sítích s obecně nesymetrickou a deformovanou proudovou a napěťovou soustavou*. [on line] (13.10.2009) Prezentáční materiál kurzu MPQ1. UEEN FEKT VUT Brno. [https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/86984/Doplky/Vykony\\_def\\_nesym.pdf](https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/86984/Doplky/Vykony_def_nesym.pdf)
- [10] DUGAN, R.C.; MC GRANAGHAM, M.F.; SANTOSO, S.; BEATY H.W., *Electrical Power Systems Quality. Second edition*. McGraw-Hill, New York, 2002
- [11] FASSBINDER, S.: *Harmonics. Capacitors in Harmonic-Rich Environments* [on line] (22.04.2009), Copper Development Association Publication. <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pqug/312-capacitors-in-harmonic-rich-environments.pdf>
- [12] FASSBINDER, S.: *Harmonics. Passive Filters* [on line] (22.04.2009), Copper Development Association Publication. [http://www.leonardo-energy.org/webfm\\_send/2798](http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/2798)
- [13] GARDIAN, P., *Kvalita elektrickej siete - Vyššie harmonické napätia a prúdy*, [ON LINE] (11.05.2009), [http://www.power-grid.eu/prednaska\\_BA.pdf](http://www.power-grid.eu/prednaska_BA.pdf)
- [14] CHAPMAN, D.: *Harmonics. Causes and effects* [on line] (11.04.2009), Copper Development Association Publication. [http://www.leonardo-energy.org/webfm\\_send/115](http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/115)
- [15] CHAPMAN, D.: *Power Quality Application Guide. Introduction* [on line] (11.04.2009), Copper Development Association Publication. <http://www.leonardo-energy.org/repository/Library/PQGuide/1.Introduction/1.1%20Intro%20to%20Power%20Quality.pdf>
- [16] KORENC, V., HOLOUBEK, J.: *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. IN-EL, Praha, 1999

- [17] KMB SYSTEMS: *Komponenty pro rychlou kompenzaci*, [ON LINE] (23.03.2010), [http://www.kmb.cz/07/doc/NOVAR\\_13xx-Prospekt-v3-cze.pdf](http://www.kmb.cz/07/doc/NOVAR_13xx-Prospekt-v3-cze.pdf)
- [18] KMB SYSTEMS: *Regulátory jalového výkonu*, [ON LINE] (23.03.2010), [http://www.kmb.cz/07/doc/NOVAR\\_1xx\\_2xx-Navod\\_k\\_obsluze-v21-cze.pdf](http://www.kmb.cz/07/doc/NOVAR_1xx_2xx-Navod_k_obsluze-v21-cze.pdf)
- [19] LEVERT, J.: *The Five Faces of Distortion*. [ON LINE] ( 25.04.2009) , <http://gain11.wordpress.com/2008/07/14/the-five-faces-of-distortion/>
- [20] ORSÁGOVÁ, J., *Rozvodná zařízení*. Scriptum. VUT, Brno, 2006
- [21] SAMUEL, B.: *Active Harmonic Conditioners* [on line] (05.05.2009), Copper Development Association Publication. <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pqug/333-active-harmonic-conditioners.pdf>
- [22] SAMUEL, B.: *TrueRMS. The Only True Measurement* [on line] (05.05.2009), Copper Development Association Publication. <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pqug/322-true-rms--the-only-true-measurement.pdf>
- [23] SEDLÁČEK, J.; VALSA, J., *Elektrotechnika II*. Scriptum. VUT, Brno, 2006
- [24] TUOMAINEN, M., *Harmonics and Reactive Power Compensation in Practice*, Nokian Capacitors Ltd., Tampere 2004
- [25] ZEZ SILKO: *Power factor correction. Kompenzace jalové energie*, [ON LINE] (16.03.2010), <http://www.zez-silko.cz/PDFs/pfcnew.pdf>
- [26] ČSN EN 50160:1999. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítěv*. Český normalizační institut, 2000
- [27] ČSN EN 61000-4-30:2003. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4: Zkušební a měřicí technika – Oddíl 30: Metody měření kvality elektrické*. Český normalizační institut, 2004
- [28] MEgA: *PQ Monitor – MEg 30. Uživatelská příručka*. Brno, 2008