



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Bakalářská práce

**Vliv nelineárních spotřebičů na distribuční
sít'**

**Influence of non-linear loads on power distribution
system**

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Sýkora, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Praha 2018

David Černý

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černý** Jméno: **David** Osobní číslo: **439547**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv nelineárních spotřebičů na distribuční síť

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of non-linear loads on power distribution system

Pokyny pro vypracování:

1. Provoz rozvodných sítí a parametry pro hodnocení kvality elektrické energie.
2. Zdroje rušení v distribuční síti a jejich eliminace.
3. Náklady na odstranění pronikání vyšších harmonických v určitém úseku sítě.
4. Provedte měření kvality elektrické energie v síti a jeho vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Toman P., a spol.: Provoz distribučních soustav, ČVUT v Praze 2011
- [2] Tlustý J., a spol.: Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí, ČVUT v Praze 2011
- [3] Pravidla provozování distribučních soustav
- [4] ČSN EN 50 160

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Sýkora, Ph.D., PREdistribuce, a.s. Svornosti 3199/19a, 150 00 Praha 5

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.03.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Tomáš Sýkora, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pramenů v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne

.....

Podpis autora práce

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Sýkorovi, Ph.D. ze společnosti PREdistribuce, a.s. za vedení při psaní této práce a veškeré poskytnuté podklady, dále konzultantovi Ing. Miroslavu Vítkovi, CSc. za cenné rady a informace a především své rodině za veškerou podporu při studiu.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá otázkou kvality elektrické energie v souvislosti s nelineárními spotřebiči a jejich zpětnými vlivy na distribuční síť. V teoretické části je popsán provoz sítí na území České republiky, jejich členění a uspořádání. Dále jsou popsány parametry pro hodnocení kvality elektrické energie a navazující problematika rušení v elektrické síti. Část je zde věnována analýze vyšších harmonických frekvencí a způsobům jejich vyšetřování. V návaznosti na předchozí kapitoly jsou představeny nelineární spotřebiče jako zdroje rušení v síti nízkého napětí a problémy, které způsobují. V závěru teoretické části jsou popsány způsoby eliminace vzniku a šíření rušení v sítích nízkého napětí. V rámci praktické části bylo provedeno měření kvality elektrické energie v síti nízkého napětí ve spolupráci se společností PREdistribuce, a.s. a následně bylo provedeno vyhodnocení naměřených údajů. Měřením bylo prokázáno, že z hlediska ČSN EN 50160 došlo k překročení povolených limitů pro flickr, na základě čehož jsou navržena dvě nápravná opatření. Na závěr práce bylo pro výběr nejlepšího řešení provedeno technicko-ekonomické zhodnocení obou variant a závěrečné doporučení pro realizaci.

Klíčová slova

ČSN EN 50160, distribuční síť, flickr, fluktuace napětí, kvalita elektrické energie, měření kvality elektrické energie, nelineární spotřebiče, pasivní a aktivní filtry, rušení v elektrické síti, účinník, vyšší harmonické

Annotation

This Bachelor's thesis deals with electric power quality in connection with non-linear loads and their retrograde effect on the distribution network. In theoretical part I described the operation and structuring of the networks in Czech republic. Then I described characteristics for evaluation of power quality and following up matters of power disturbances. Chapter is dedicated to analysis of harmonic frequencies and the ways of their inspection. As a follow-up to previous chapters I introduce non-linear loads as the origin of power disturbance in the low-voltage networks and the problems caused by them. In the end of theoretical part I described ways of elimination of creation and spreading of power disturbances. For the practical part I measured electric power quality in low-voltage network which I did in cooperation with PREDistribuce, a. s. Then I evaluated measured results. Measurement showed that flicker limits were surpassed according to ČSN EN 50160 and based on that I suggested two corrective measures. In the conclusion of my thesis to find the best solution I did technical economic evaluation of both options and added final recommendation for implementation.

Keywords

ČSN EN 50160, distribution network, electrical power network disturbance, flicker, harmonics, non-linear loads, passive and active harmonic filter, power factor, power quality, power quality measurement, voltage fluctuation

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam zkratk a symbolů | 12 |
| Úvod | 16 |
| Teoretická část..... | 17 |
| 1 Provoz sítí a kvalita elektrické energie..... | 17 |
| 1.1 Provoz sítí v ČR | 17 |
| 1.1.1 Napěťové úrovně provozované v podmínkách ČR..... | 17 |
| 1.1.2 Uspořádání elektrických sítí | 17 |
| 1.1.3 Způsoby provozu uzlů jednotlivých napěťových hladin | 18 |
| 1.2 Parametry pro hodnocení kvality elektrické energie | 20 |
| 1.2.1 Kmitočet | 20 |
| 1.2.2 Napětí | 21 |
| 2 Zdroje rušení a jejich eliminace | 24 |
| 2.1 Zdroje rušení v distribuční síti..... | 24 |
| 2.1.1 Teorie rozkladu harmonického průběhu..... | 24 |
| 2.1.2 Složkové soustavy | 26 |
| 2.1.3 Výkony v obvodech s výskytem harmonických..... | 27 |
| 2.1.4 Vyšetřování harmonických..... | 28 |
| 2.1.5 Nelineární spotřebiče..... | 30 |
| 2.1.6 Příklady nelineárních spotřebičů | 34 |
| 2.1.7 Problémy způsobené vyššími harmonickými | 35 |
| 2.1.8 Meziharmonické | 37 |
| 2.2 Způsoby eliminace rušení v distribučních sítích NN..... | 41 |
| 2.2.1 Omezování harmonických bez použití přídavného zařízení..... | 41 |
| 2.2.2 Omezování harmonických s použitím přídavného zařízení..... | 41 |
| 2.2.3 Prostředky pro omezení kolísání napětí..... | 48 |
| Praktická část..... | 49 |
| 3 Měření kvality elektrické energie a jeho vyhodnocení..... | 49 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Úvod měření..... | 49 |
| 3.2 | Použité přístroje a software..... | 49 |
| 3.3 | Popis měřících bodů..... | 49 |
| 3.4 | Měření..... | 54 |
| 3.5 | Zhodnocení měření..... | 65 |
| 4 | Ekonomické zhodnocení opatření pro splnění standardů kvality elektrické energie | 66 |
| 4.1 | Technicko-ekonomické zhodnocení projektu | 66 |
| 4.2 | Vztahy pro výpočty | 69 |
| 4.3 | Varianta A..... | 69 |
| 4.4 | Varianta B | 71 |
| | Zhodnocení..... | 73 |
| | Použitá literatura | 75 |
| | Seznam obrázků | 77 |
| | Seznam tabulek | 78 |
| | Seznam grafů..... | 79 |

Seznam zkratek a symbolů

| | |
|--------------------|---|
| a_0 | Fourierův koeficient |
| AF | Aktivní filtr |
| a_k | Fourierův koeficient a pro k-tou složku |
| b_k | Fourierův koeficient b pro k-tou složku |
| C | Kapacita |
| CF | Cash flow |
| $\cos\varphi_1$ | Účinitk před připojením FKZ |
| $\cos\varphi_{1F}$ | Účinitk po připojení FKZ |
| $\cos\varphi_k$ | účinitk pro k-tou harmonickou |
| C_p | Měsíční stálá složka ceny elektrické energie |
| C_w | Cena za spotřebovanou kWh |
| $d\%$ | Napěťová změna v % |
| DCF | Diskontované cash flow |
| DS | Distribuční soustava |
| ERÚ | Energetický regulační úřad |
| ES | Elektrizační soustava |
| f | Frekvence |
| FKZ | Filtračně kompenzační zařízení |
| f_r | Rezonanční kmitočet |
| FVE | Fotovoltaická elektrárna |
| HC | Celkový obsah harmonických |
| HDO | Hromadné dálkové ovládání |
| I | Efektivní hodnota proudu |
| $i(t)$ | Časový průběh proudu |
| I_0 | Stejnoseměrná složka proudu |
| I_1 | Celkový proud 1. harmonické před připojením FKZ |
| I_{1F} | Celkový proud 1. harmonické po připojení FKZ |
| I_{avr} | Roční průměrná hodnota proudu |
| I_C | Hodnota proudu pro návrh pasivního filtru |
| I_{CN} | Jmenovitá hodnota proudu |
| $I_{\xi 1}$ | Činný proud 1. harmonické před připojením FKZ |
| $I_{\xi 1F}$ | Činný proud 1. harmonické po připojení FKZ |
| $I_{h\%}$ | Poměrná hodnota proudu v % |
| I_{j1} | Jalový proud 1. harmonické před připojením FKZ |

| | |
|-------------------|---|
| I_{j1F} | Jalový proud 1. harmonické po připojení FKZ |
| I_k | Proud pro k-tou harmonickou |
| I_k | Hodnota proudu pro k-tou harmonickou |
| I_{rms} | Efektivní hodnota proudu |
| k | Řád harmonické |
| kV | Kilo Volt |
| l | Délka |
| L | Indukčnost |
| MVE | Malá vodní elektrárna |
| N_{kWh} | Náklady na kWh spotřebované energie |
| NN | Nízké napětí |
| NPV | Čistá současná hodnota |
| N_{zcelk} | Celkové náklady na ztráty v transformátoru |
| P | Činný výkon |
| $p(t)$ | Časový průběh výkonu |
| P_0 | Jmenovité ztráty v transformátoru naprázdno |
| PCC | Společný napájecí bod |
| PDS | Provozovatel distribuční soustavy |
| PF | Pasivní filtr |
| P_k | Výkon k-té harmonické |
| P_{kn} | Jmenovité ztráty v transformátoru nakrátko |
| P_{lt} | Dlouhodobý faktor blikání |
| P_m | Maximální zatížení ve sledovaném období |
| PPDS | Pravidla provozu distribučních soustav |
| PS | Přenosová soustava |
| P_{st} | Krátkodobý faktor blikání |
| PWHD | Částečné vážené harmonické zkreslení |
| PWM | Pulsně šířková modulace |
| PWM | Pulsně šířková modulace |
| P_Z | Ztrátový výkon kondenzátoru |
| $P_{z\text{kab}}$ | Činné ztráty v kabelu |
| Q | Jalový výkon |
| Q_{\sim} | Neaktivní výkon |
| Q_C | Hodnota náboje pro návrh pasivního filtru |
| Q_{CN} | Jmenovitá hodnota náboje |
| Q_k | Efektivní hodnota harmonické složky řádu k |

| | |
|--------------------|--|
| R | Činný odpor kabelu |
| r | Diskontní sazba |
| RIS | Rozpínací instalační skříň |
| rms | Efektivní hodnota |
| R_s | Činný odpor vedení |
| s | Průřez |
| S | Zdánlivý výkon |
| S_{ks} | Zkratový výkon |
| S_m | Maximální zatížení transformátoru ve sledovaném období |
| S_n | Jmenovitý výkon transformátoru |
| T | Perioda |
| TDC | Celkový obsah zkreslení |
| TDF | Celkový činitel zkreslení |
| TDR | Celkové zkreslení |
| tg δ | Ztrátový úhel |
| THD | Celkové harmonické zkreslení |
| THD _I % | Harmonické zkreslení proudu v % |
| THD _U % | Harmonické zkreslení napětí v % |
| THF | Činitel harmonického zkreslení |
| T_m | Doba využití maxima |
| T_{pr} | Počet provozních hodin |
| TS | Trafostanice |
| T_z | Doba plných ztrát |
| U | Efektivní hodnota napětí |
| u(t) | Časový průběh napětí |
| U_0 | Stejnoseměrná složka napětí |
| U_1 | Napětí zdroje |
| U_C | Hodnota napětí pro návrh pasivního filtru |
| U_{CN} | Jmenovitá hodnota napětí |
| $U_{h\%}$ | Poměrná hodnota napětí v % |
| U_k | Napětí k-té harmonické |
| U_k | Hodnota napětí pro k-tou harmonickou |
| U_{KF} | Napětí harmonických po připojení FKZ |
| U_{rms} | Efektivní hodnota napětí |
| U_z | Napětí na svorkách zátěže |
| VN | Vysoké napětí |

| | |
|----------------------|--|
| VVN | Velmi vysoké napětí |
| W_T | Celková dodaná energie za sledované období |
| W_z | Ztráty v transformátoru za sledované období |
| $x(t)$ | Funkce v závislosti na čase |
| X_s | Reaktance vedení |
| Y | Proměnná |
| Y_1 | Proměnná pro 1. harmonickou |
| Y_k | Proměnná pro k-tou harmonickou |
| $y_{k\%}$ | Poměrná hodnota v % pro k-tou harmonickou |
| Z_{L1} | Impedance fáze L1 |
| Z_S | Impedance soustavy |
| Z_{SF} | Impedance soustavy po připojení FKZ |
| ZVN | Zvláště vysoké napětí |
| ΔN_{pr} | Rozdíl ročních provozních nákladů |
| ΔP_{zkab} | Rozdíl činných ztrát v kabelu |
| ΔU | Úbytek napětí |
| ΔU_1 | Úbytek napětí základní harmonické před připojením FKZ |
| ΔU_{1F} | Úbytek napětí základní harmonické po připojení FKZ |
| ΔU_K | Úbytek napětí vzniklý působením nelineárního spotřebiče |
| ΔU_K | Napětí vyšších harmonických vyšších řádů před připojením FKZ |
| ΔU_{KF} | Napětí vyšších harmonických vyšších řádů po připojení FKZ |
| ΔU_P | Povolená odchylka napětí |
| λ_{\sim} | Činitel neaktivního výkonu |
| ρ_{Al20} | Měrný odpor hliníkového vodiče při 20°C |
| ρ_F | Činitel filtrace |
| ρ_K | Činitel kompenzace |
| $\varphi_{U,1,k}$ | Fázový posun napětí/proudu pro k-tou harmonickou |
| ω | Úhlová frekvence základní harmonické |
| ω_1 | Úhlová frekvence 1. harmonické |
| \hat{U}_0 | Fázor netočivé složky napětí |
| \hat{U}_1 | Fázor sousledné složky napětí |
| \hat{U}_2 | Fázor zpětné složky napětí |
| $\hat{U}_{A,B,C}$ | Fázory napětí v třífázové soustavě |
| \hat{T} | Transformační matice |
| \hat{a}, \hat{a}^2 | Úhlové natočení fázoru |

Úvod

Téma této práce bylo navrženo společností PREDistribuce, a.s. a zpracování probíhalo pod odborným dohledem pracovníka této společnosti Ing. Tomáše Sýkory, Ph.D. Cílem této bakalářské práce je seznámení s problematikou kvality elektrické energie v distribuční síti na úrovni NN a propojení teoretických poznatků s praxí v rámci praktického měření a vyhodnocení stavu sítě.

S provozem elektrických sítí vzniká otázka kvality elektrické energie, jež je zásadním parametrem jak pro distributora, tak pro konečného odběratele. Kvalita elektrické energie musí odpovídat příslušným vyhláškám Energetického regulačního úřadu souhrnně uvedených v PPDS. Nekvalitní dodávka elektrické energie může podléhat sankcím ze strany odběratele, jelikož je distributor smluvně zavázán dodávat kvalitní energii. Provozem elektrických sítí a parametry pro hodnocení kvality se zabývá první kapitola této práce.

Kvalita elektrické energie je však ovlivňována také ze strany spotřebitele připojováním příslušných zařízení do sítě. Druhá kapitola práce se takovými zařízeními zabývá, a to konkrétně nelineárními spotřebiči, které jsou primárním zdrojem harmonického rušení v sítích NN. Je zde uveden popis nelineárních spotřebičů po stránce teoretické s rozбором typických příkladů a také problémy, které nelineární spotřebiče způsobují. Rušení emitované těmito zdroji nelze samozřejmě nechat bez povšimnutí. V závěru druhé kapitoly jsou tak uvedeny základní metody jak pro omezování emise harmonického rušení, tak pro jeho samotnou eliminaci v sítích NN. Mimo harmonické rušení je zde nastíněna problematika týkající se poklesů napětí, jejich vlivů na člověka a způsoby, jimiž se poklesy omezují.

Navazující částí je část praktická. Její náplní je zpracování hodnot z měření kvality elektrické energie, které bylo provedeno v městské čtvrti Hodkovičky v Praze 4 v bodech s potenciálním výskytem rušení. Výsledky měření prokázaly překročení limitu pro míru vjemu flikru, což je také jedním z parametrů určujícím kvalitu. Průběh měření a naměřené údaje jsou zpracovány v třetí kapitole.

Poslední, čtvrtá kapitola je věnována návrhu dvou možných variant pro eliminaci flikru v úseku sítě, kde nebyly splněny standardy kvality. Varianty jsou posouzeny z hlediska technické proveditelnosti, kde jsou uvedeny potřebné údaje pro rekonstrukci, a z hlediska ekonomické proveditelnosti zahrnující kalkulaci veškerých nákladů souvisejících s rekonstrukcí. Výhodnější varianta je posléze vybrána metodou čisté současné hodnoty a doporučena pro realizaci.

Teoretická část

1 Provoz sítí a kvalita elektrické energie

1.1 Provoz sítí v ČR

Elektrizační soustava je propojeným systémem všech vedení a zařízení sloužících pro výrobu, přenos, distribuci a spotřebu elektrické energie. Je dále dělena na soustavu přenosovou a distribuční. Přenosová soustava zahrnuje všechna vedení a zařízení určená pro přenos elektrické energie od výrobce k distributorovi a tvoří tak páteřní systém celé elektrizační soustavy. Dále je tvořena systémy měřícími, ochrannými, zabezpečovacími, řídicími a komunikačními. Současně také slouží k vyvedení výkonu za hranice ČR. Distribuční soustava zahrnuje vedení a zařízení určených pro rozvod elektrické energie ke konečnému spotřebiteli. Její součástí jsou dále systémy měřící, ochranné, zabezpečovací, řídicí a komunikační. Součástí DS jsou také malé zdroje označované jako vnořené zdroje. Jak PS, tak DS jsou zřizovány a provozovány v zájmu veřejném. [1]

Jednotlivé části elektrizační soustavy jsou charakterizovány několika parametry, a to jmenovitým napětím, způsobem provozu sítí a způsobem provozu uzlu transformátoru.

1.1.1 Napětové úrovně provozované v podmínkách ČR

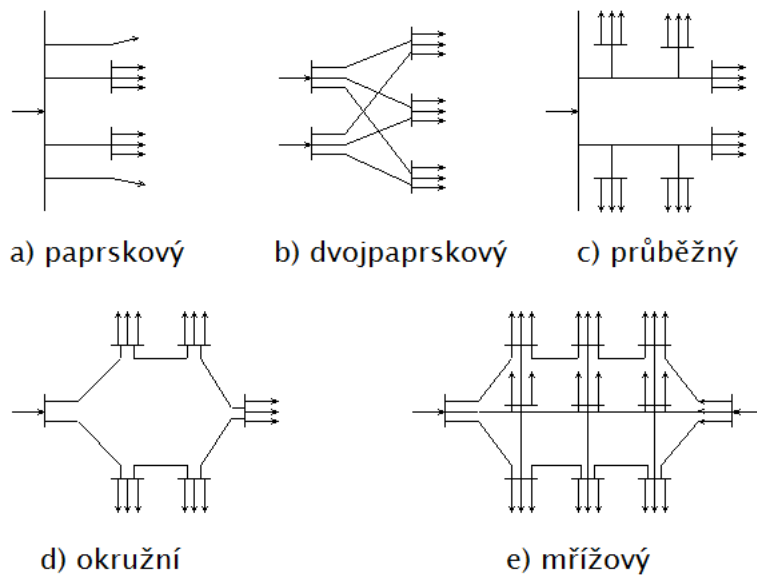
Elektrizační soustava je provozována na několika napětových hladinách v závislosti na povaze dané soustavy. **Soustava přenosová** je provozována na napětových hladinách ZVN a VVN, konkrétně 400 a 220 kV a na některých vybraných vedení 110 kV. Na tyto napětové hladiny je vyveden výkon z velkých systémových elektráren.

Podružná **soustava distribuční** propojená transformační vazbou na PS se provozuje na úrovni VVN, VN a VN, tedy na 110 kV, 35 kV, 22 kV a konečných 0,4 kV. Z napětové hladiny 22 kV jsou zásobováni velkoodběratelé, ze hladiny NN pak maloodběratelé. Spotřebitelé jsou pak připojováni ve společném napájecím bodě (tzv. PCC), což je místo v rozvodné síti elektricky nejbližší danému odběrateli.

1.1.2 Uspořádání elektrických sítí

Uspořádání elektrických sítí nám říká, jakým způsobem je řešena cesta od zdroje ke spotřebiteli. Pokud je energie dodávána jednou cestou, jedná se o **rozvod otevřený**. Ten lze dále dělit na **rozvod průběžný a paprskový**. Výhodné jsou zejména z hlediska přehlednosti, kdy lze snadněji vyhledat případnou poruchu. Nevýhoda tohoto rozvodu je nižší spolehlivost z důvodu jednobodového napájení.

Pokud je síť napájena z více stran, jedná se o **rozvod uzavřený**. Ten může být řešen jako **okružní rozvod** či **mřížová síť**. Zásadní výhodou proti otevřeným rozvodům je zde vyšší spolehlivost dodávky z důvodu více bodového napájení. Další výhodou je menší náchylnost k poklesům napětí. Uzavřené sítě lze rovněž provozovat jako síť paprskové rozpojením sítě v určitém bodě. Ke spojení pak dochází pouze v případě poruchy k zabezpečení dodávky. Pro tento způsob provozu je však třeba počítat při dimenzování vedení. Jako nejspolehlivější lze označit síť mřížovou. [2] Jednotlivé typy rozvodů jsou znázorněny na Obr. 1.



Obr. 1 Druhy rozvodů [1]

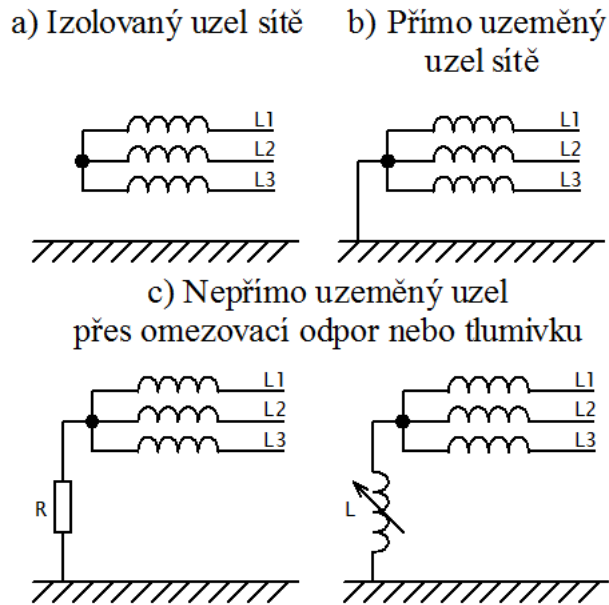
1.1.3 Způsoby provozu uzlů jednotlivých napěťových hladin

Pro provoz elektrických sítí je velice důležitý způsob zapojení uzlu vinutí distribučního transformátoru. Způsob zapojení nulového bodu je totiž rozhodující pro chování sítě v případě spojení jedné nebo více fází se zemí. Způsob propojení uzlu transformátoru se zemí je tedy klíčový při návrhu ochrany dimenzování dané elektrické sítě. Jednotlivé zapojení uzlů jsou znázorněny na Obr. 2.

Zemní poruchy se dělí na:

- **zemní spojení**
- **zemní zkrat**

Zemní spojení vzniká v případě, pokud je uzel transformátoru izolován či propojen se zemí přes zášací tlumivku (tzv. nepřímo uzemněný uzel) a dojde ke spojení jedné fáze se zemí. V případě, že je uzel přímo uzemněný či spojený se zemí přes omezovací odpor a dojde ke spojení jedné či více fází se zemí, jedná se o **zemní zkrat**. U poruch nás zajímá zejména velikost poruchového proudu a velikost napětí mezi fázovým vodičem a zemí. [3]



Obr. 2 Způsoby provozu uzlů

V Tab. 1 jsou uvedena principiální řešení jednotlivých napěťových hladin provozovaných v ČR.

Tab. 1 Principiální řešení jednotlivých napěťových hladin [1]

| | Napěťová úroveň | Jmenovité napětí | Uspořádání rozvodu | Spojení uzlu transformátoru |
|----------------------|-----------------|----------------------------------|--|---|
| Nadřazená soustava | vvn | 400 kV | Okružní | Účinně uzemněný |
| | | 220 kV | | |
| Distribuční soustava | vn | 110 kV | Okružní, paprskový | Neúčinně uzemněný - většinou kompenzovaný |
| | | 22 kV, 35 kV | | |
| | | 10 kV | | |
| | nn | 6 kV | Průběžný, paprskový, dvojpaprskový (obvykle s možností spojení do okružního) | Neúčinně uzemněný, nebo izolovaný |
| | | 500 V | | |
| | 400/230 V | Průběžný, paprskový, mřížová síť | Účinně uzemněný s vyvedeným středním vodičem | |

1.2 Parametry pro hodnocení kvality elektrické energie

Pro definování kvality elektrické energie je nutné stanovit několik parametrů, které bude možné měřit a určit jejich dovolené hodnoty pro legislativu. Parametry napětí elektrické energie, nebo tzv. systémové veličiny slouží pro hodnocení kvality dodávané elektrické energie konečnému odběrateli. Tyto parametry zaručuje provozovatel sítě a vychází z normy ČSN EN 50160 [4]. Mezi ně patří:

- kmitočet sítě
- velikost napájecího napětí
- odchylky napájecího napětí
- rychlé změny napětí
- velikost rychlých změn napětí
- míra vjemu flikru
- krátkodobé poklesy napájecího napětí
- nesymetrie napájecího napětí
- harmonická napětí
- meziharmonická napětí
- úrovně napětí signálů v napájecím napětí
- krátkodobá přerušení napájecího napětí
- dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí.

Tyto charakteristiky platí pro napětí v místech připojení odběratelů z veřejných distribučních sítí NN, VN a VVN za běžných provozních podmínek. V mimořádných podmínkách může samozřejmě dojít k narušení těchto parametrů. Mezi mimořádné podmínky patří např.:

- dočasné provozní podmínky v případě poruchy, údržby či výstavby sítě
- stav instalace neodpovídající podmínkám provozování distribuční sítě
- výjimečné situace, jako jsou: mimořádné povětrnostní podmínky, přírodní katastrofy, cizí zavinění, průmyslová činnosti, vyšší moc apod. [5]

1.2.1 Kmitočet

Za běžných provozních podmínek je kmitočet sítě 50 Hz s povolenou tolerancí ± 1 % (tj. 49,5...50,5 Hz) po 99,5 % roku. Po 100 % času pak musí být v mezích 50 Hz + 4 % a 50 Hz - 5 % (tj. 47...52 Hz). [6]

1.2.2 Napětí

Za běžných provozních podmínek je pro sítě 110 kV a 220 kV dovolený rozsah $\pm 10\% U_n$ a pro sítě 400 kV $\pm 5\% U_n$. Pro sítě NN je dovolený rozsah U_n též v mezích $\pm 10\%$. V těchto dovolených mezích musí být během týdne 95 % průměrných efektivních hodnot U_n měřených v 10ti minutových intervalech. U 100 % měřících intervalů musí být pro sítě 110 kV a NN v mezích $+10\%/-15\%$ od jmenovité hodnoty. [6]

Rychlé změny napětí

Rychlé periodické změny napětí způsobují tzv. flickr. Flickr je jev projevující se změnou zrakového vnímání, což může mít rušivý vliv na člověka. Dochází k tomu v případě, že se rychle mění napájecí napětí světelných zdrojů, s čímž dochází k rychlým změnám světelného toku (blikáním) vnímaného zrakem člověka. Míra vjemu flickru se měří flickrmetrem, který je popsán v normě ČSN EN 61000-4-15 a bývá součástí multifunkčního analyzátoru kvality elektrické energie. Dlouhodobá míra vjemu flickru (nebo-li dlouhodobý faktor blikání P_{fl}) musí být za běžných provozních podmínek během 95 % času menší než 1. [1] [5]

Krátkodobé poklesy a přerušení napětí

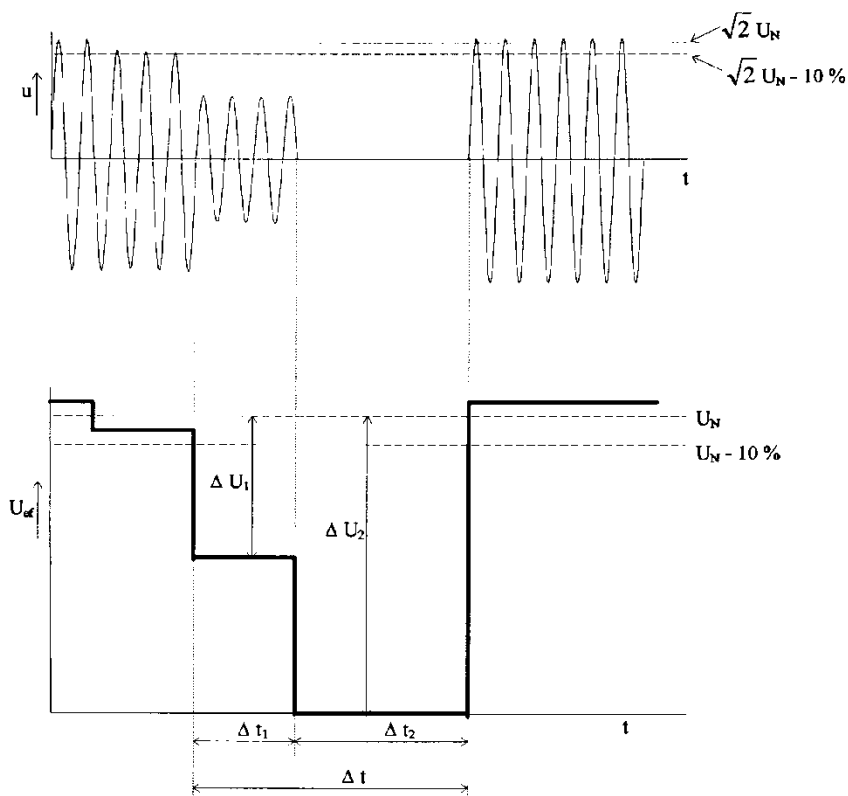
Krátkodobé poklesy a přerušení jsou většinou náhodné a nepředvídatelné jevy vyskytující se v elektrické síti. Jejich četnost výskytu se mění podle typu sítě a sledovaného místa. [6]

Krátkodobý pokles napětí: pokles napájecího napětí po kterém dojde k obnovení napětí za krátký časový úsek. Tato doba trvání je mezi 10 ms a 1 minutou. Krom doby trvání jsou krátkodobé poklesy napětí popsány hloubkou poklesu. Hloubka poklesu je definována rozdílem mezi minimální efektivní hodnotou v průběhu poklesu a jmenovitým napětím sítě. Vyjadřuje se v procentech jmenovitého napětí. Pokud nedojde k poklesu pod 90 % dohodnutého napětí, jedná se pouze o odchylku napětí, nikoliv o krátkodobý pokles napětí.

Přerušení napájení: stav, kdy je napětí v odběrném místě menší než 1 % napětí jmenovitého. Může být:

- **předem dohodnuté:** v případě plánovaných odstávek a prací na distribuční síti, přičemž je odběratel blíže informován,
- **poruchové:** zapříčiněné trvalými nebo přechodnými poruchami; dále je rozlišováno krátkodobé přerušení (do 3 min) a dlouhodobé přerušení (nad 3 min).

Krátkodobý pokles napětí a přerušení napájení je znázorněno na Obr. 3.



Obr. 3 Znáornění poklesu a přerušení napětí [7 str. 3]

Příčiny těchto jevů mohou být způsobeny např. spínáním výkonných zařízení s velkým proudovým nárazem při zapínání, zkratem v dané soustavě a následném vybavení ochran, změnami jalové a činné složky proudu a tím vyvolaných změn úbytků napětí na impedancích sítě či změnami zkratového výkonu. Poruchy způsobené uživateli by v případě správně dimenzované sítě neměly mít na napětí velký vliv.

Nesymetrie napětí

Za běžných podmínek musí být během 95 % času maximálně 2 % sousledné složky. [6]
 pozn. Sousledná složka v souvislosti se složkovými soustavami bude popsána v kap.2.1.2.

Harmonická napětí

V PPDS [6] je uvedena tabulka, kde jsou uvedeny dovolené úrovně jednotlivých harmonických složek, jež musí za normálních provozních podmínek být v libovolném týdenním období v 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot. Úrovně jsou vyjádřeny v procentech základní harmonické. Dále je uveden činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí, který musí být menší nebo roven 8 %. V tabulce jsou uvedeny harmonické do 25. řádu, vyšší se neuvažují.

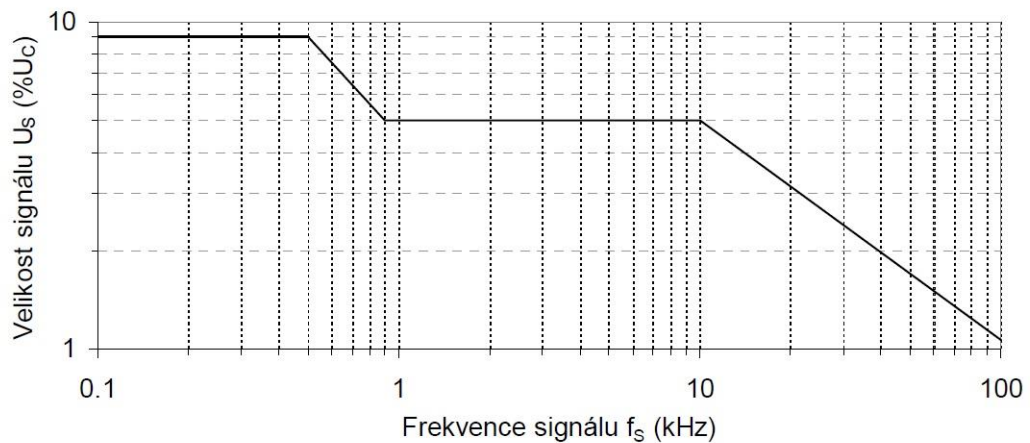
Meziharmonická napětí

S rozvojem polovodičových měničů se začaly v sítích mimo harmonických napětí objevovat i frekvence meziharmonické. V jisté míře mohou způsobovat flickr či rušení v systémech HDO. [6]

pozn. Teorie vyšších harmonických a meziharmonických frekvencí je popsána podrobněji v kap.2.1.

Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Veřejné sítě mohou být krom přenosu elektrické energie využívány provozovatelem DS k přenosu informací, zpravidla systémy HDO a PLC. Na Obr. 4 jsou uvedeny dovolené střední hodnoty napětí signálů měřené po dobu 3 sekund po dobu 99 % dne. [6]



Obr. 4 Úrovně napětí na kmitočtech signálů v % U_s v DS [6 str. 11]

2 Zdroje rušení a jejich eliminace

2.1 Zdroje rušení v distribuční síti

2.1.1 Teorie rozkladu harmonického průběhu

Aby bylo možné se podrobněji zabývat harmonickými napětími a jejich významem v elektrických sítích, je třeba je nejprve teoreticky popsat. Každý střídavý periodický průběh lze rozložit na nekonečný součet sinusových a kosinových průběhů, které jsou násobkem základního kmitočtu periodického průběhu. Tyto násobky pak nazýváme harmonická napětí, nebo také tzv. "vyšší harmonické". Tento rozklad se provádí tzv. Fourierovou transformací. Pro uvedení do problematiky si matematicky vyjádříme Fourierovou řadu periodické funkce s úhlovou frekvencí ω na intervalu $\langle -\pi, \pi \rangle$:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)) \quad (2.1.1)$$

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos 2(\omega t) + b_2 \sin 2(\omega t) + \dots \quad (2.1.2)$$

kde: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad f = \frac{1}{T}$ (2.1.3)

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} x(\omega t) d(\omega t) \quad (2.1.4)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} x(\omega t) \cos(k\omega t) d(\omega t) \quad (2.1.5)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} x(\omega t) \sin(k\omega t) d(\omega t) \quad (2.1.6)$$

[8] [5]

Předchozí vzorce platí obecně pro periodickou funkci. Nyní si je upravíme pro časové průběhy napětí a proudu:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^q U_k \quad (2.1.7)$$

kde: $u_k(t) = \sqrt{2}U_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_{U,k})$ (2.1.8)

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^q I_k \quad (2.1.9)$$

kde: $i_k(t) = \sqrt{2}I_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_{I,k})$ (2.1.10)

Pro efektivní hodnoty napětí a proudu platí vztahy:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{k=1}^q U_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_{U,k}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^q U_k^2} \quad (2.1.11)$$

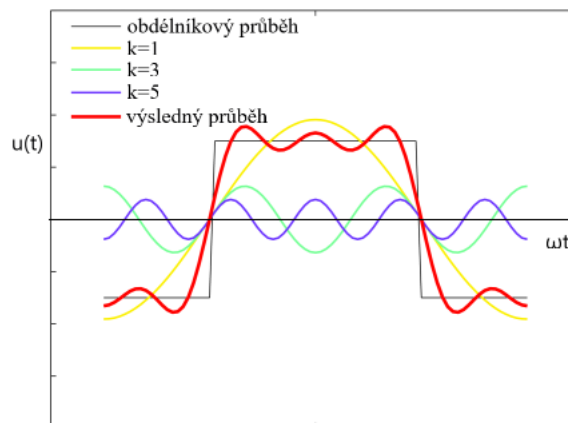
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{k=1}^q I_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_{I,k}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^q I_k^2} \quad (2.1.12)$$

[8] [9]

pozn. Pro technické účely se využívá obdoby Fourierovi transformace, a to tzv. diskrétní Fourierovi transformace, kde je zahrnuté vzorkování signálu pro potřeby digitální měřicí techniky. [9]

Ideální průběh napětí a proudu v distribuční síti je harmonický sinusový průběh o frekvenci 50 Hz. Ne všechny spotřebiče však odebírají sinusový proud, čímž tedy odebírají proudy, jejichž spektrum se skládá z vyšších harmonických frekvencí. Jednotlivé složky vyšších harmonických frekvencí označujeme celým číslem, které vyjadřuje celistvý násobek frekvence základní harmonické. Toto číslo označujeme jako řád harmonické [5]. Zdroje těchto vyšších harmonických frekvencí budou podrobněji popsány v kap. 2.1.5.

Pro přiblížení, jak takový rozklad harmonického průběhu vypadá, je na Obr. 5 znázorněna syntéza obdélníkového průběhu.

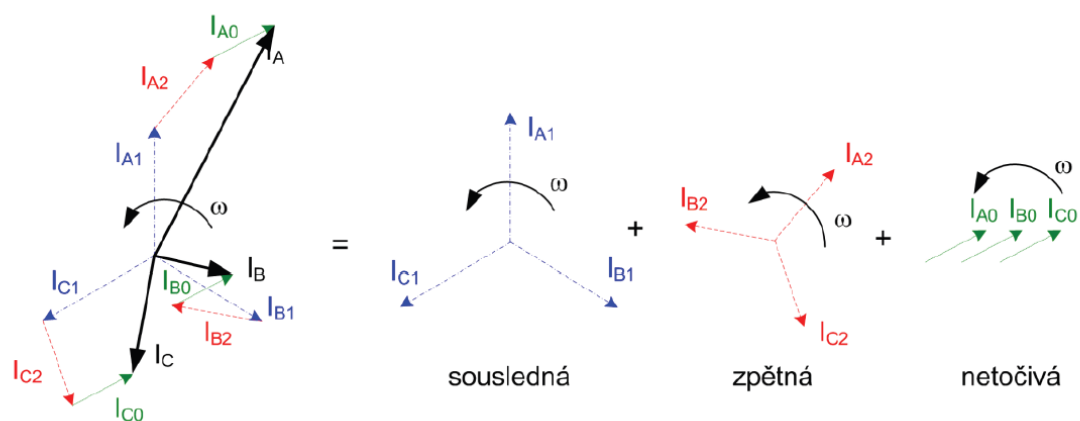


Obr. 5 Syntéza "obdélníkového" průběhu [10]

Aproximovaný obdélníkový průběh je zvýrazněn červeně. Ten je rozložen na 1., 3. a 5. harmonickou složku. Lze pozorovat, že jednu půlperiodu průběhu proběhne jeden kmit základní 1. harmonické, tři kmity třetí harmonické a pět kmitů páté harmonické. Pokud v každém bodě sečteme okamžité hodnoty všech harmonických složek, dostaneme výsledný aproximovaný průběh. Čistě obdélníkový průběh se však teoreticky skládá z nekonečného počtu harmonických. Pro praxi jsou obvykle dostačující vyšší harmonické do 40. řádu.

2.1.2 Složkové soustavy

K nesymetrii třífázové soustavy dochází při nesouměrném zatížení jednotlivých fází, zkratech, zemních spojení apod. Pro počítání s nesymetrickými soustavami se používá rozklad na složkové soustavy. Teorie složkových soustav říká, že každou nesouměrnou soustavu vektorů lze rozdělit na několik soustav souměrných, a to na složku souslednou, zpětnou a netočivou. To lze ocenit zejména v případech, kdy je třeba řešit početně složité nesymetrické poruchy. [9]



Obr. 6 Rozklad nesymetrie do složkových soustav [9 str. 23]

Transformační vztahy pro základní harmonickou

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_3 \end{bmatrix} \quad (2.1.13)$$

$$[\hat{U}_{ABC}] = [\hat{T}] \cdot [\hat{U}_{120}] \quad (2.1.14)$$

$$\hat{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \hat{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.1.15)$$

[9]

K napětové nesymetrii může dojít též u třífázových soustav s obsahem vyšších harmonických. Vlivem nelineárních zátěží a jejich nerovnoměrném rozložení na jednotlivé fáze jsou produkovány nesymetrické vyšší harmonické proudy nebo napětí. Takovou nesymetrickou soustavu lze pak také rozložit do souměrných složkových soustav. Referenční složkovou soustavou pro harmonickou daného řádu a jejích násobků je:

- sousledná složková soustava $3k+1$
- zpětná složková soustava $3k+2$
- netočivá složková soustava $3k$

[9]

2.1.3 Výkony v obvodech s výskytem harmonických

Abychom mohli v problematice nelineárních spotřebičů operovat s pojmy týkajícími se výkonu, je třeba si zavést příslušné veličiny a vztahy [11] [12].

Pro okamžitý výkon platí:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2.1.16)$$

Po dosazení při zanedbání stejnosměrné složky U_0 a I_0 :

$$p(t) = \sum_{k=1}^{\infty} u_k \cdot \sum_{l=1}^{\infty} i_l \quad (2.1.17)$$

Pro praxi pracujeme s tzv. **činným výkonem**, který se spočítá jako střední hodnota výkonu okamžitého:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{k=1}^{\infty} \cdot \sum_{l=1}^{\infty} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u_k(t) \cdot i_l(t) dt \quad (2.1.18)$$

Uvažujeme-li, že $k = l \neq 0$, dostaneme po dosazení a úpravě následující vztah:

$$P = U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = P_k \quad (2.1.19)$$

Poté lze pro (2.1.18) říci, že **celkový činný výkon** v neharmonickém obvodu je součtem činných výkonů jednotlivých harmonických složek :

$$\begin{aligned} P &= P_0 + P_1 + P_2 + \dots \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} P_k = \sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \end{aligned} \quad (2.1.20)$$

Dále si uvedeme vztahy pro **zdánlivý a jalový výkon** v neharmonickém obvodu:

$$S = U \cdot I \quad (2.1.21)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \quad (2.1.22)$$

Pro neharmonické obvody se dále zavádí pojem **neaktivní výkon**:

$$Q_{\sim} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.1.23)$$

Pro obecně periodické harmonické podmínky je znám běžný termín účinník λ , neboli $\cos\varphi$. Pro obvody neharmonické se však používá poměrně nový termín **činitel neaktivního výkonu**:

$$\lambda_{\sim} = \frac{P}{S} \quad (2.1.24)$$

Tento termín se zavádí z důvodu zjednodušení pro praktické použití. Tato dvousložková reprezentace je totiž pro praxi plně dostačující a není třeba pracovat se třemi složkami zdánlivého výkonu (P,Q,D). [12]

2.1.4 Vyšetřování harmonických

Pro vyšetřování vyšších harmonických a posuzování jejich vlivu je zavedeno několik činitelů. V kap. 1.2.2 byla uvedena dovolená hodnota THD zapsanou v PPDS. Nyní bude popsáno, jakým způsobem se tyto ukazatele spočítají a co vyjadřují. [13]

Poměrné hodnoty

Poměrné hodnoty slouží k posouzení velikosti k-té harmonické. Jsou definovány poměrem efektivních hodnot k-té harmonické ku efektivní hodnotě harmonické základní. Poměr platí jak pro proudové harmonické, tak pro napěťové (v následujících vzorcích je proto použita proměnná Y). Vyjadřuje se nejčastěji v procentech. [11]

$$y_{k\%} = \frac{Y_k}{Y_1} \cdot 100 \quad (2.1.25)$$

Celkové harmonické zkreslení THD (total harmonic distortion):

THD je ukazatelem obsahu harmonických celkového vyšetřovaného spektra. Je vyjádřen jako poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických vyšetřovaného napětí nebo proudu (dle normy do 40. řádu) k efektivní hodnotě základní harmonické.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} Y_k^2}}{Y_1} \cdot 100 \quad (2.1.26)$$

Částečné vážené harmonické zkreslení PWHd (partial weighted harmonic distortion):

PWHd vyjadřuje poměr efektivních hodnot vybraného spektra vyšších harmonických vážených řádem k (dle normy od 14. řádu) ku efektivní hodnotě harmonické základní.

$$PWHd = \frac{\sqrt{\sum_{k=14}^{40} h \cdot Y_k^2}}{Y_1} \cdot 100 \quad (2.1.27)$$

Činitel harmonického zkreslení THF (total harmonic factor):

THF vyjadřuje celkové harmonické zkreslení vyšetřované střídavé veličiny. Je vyjádřeno jako poměr efektivních hodnot obsahu harmonických ku efektivní hodnotě střídavé veličiny.

$$THF = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} Y_k^2}}{Y} \cdot 100 \quad (2.1.28)$$

Celkový obsah zkreslení TDC (total distortion content):

TDC vyjadřuje rozdíl příslušné střídavé veličiny a základní veličiny (obě jsou funkcí času)

$$TDC = 100 \sqrt{Y^2 - Y_1^2} \quad (2.1.29)$$

Celkové zkreslení TDR (total distortion ratio):

TDR vyjadřuje poměr efektivní hodnoty celkového obsahu zkreslení a efektivní hodnoty základní složky střídavé veličiny.

$$TDR = \frac{TDC}{Y_1} \cdot 100 = \frac{\sqrt{Y^2 - Y_1^2}}{Y_1} \cdot 100 \quad (2.1.30)$$

Celkový činitel zkreslení TDF (total distortion factor):

TDF vyjadřuje poměr efektivní hodnoty celkového obsahu zkreslení a efektivní hodnoty střídavé veličiny.

$$TDF = \frac{\sqrt{Y^2 - Y_1^2}}{Y} \cdot 100 \quad (2.1.31)$$

[14] [15]

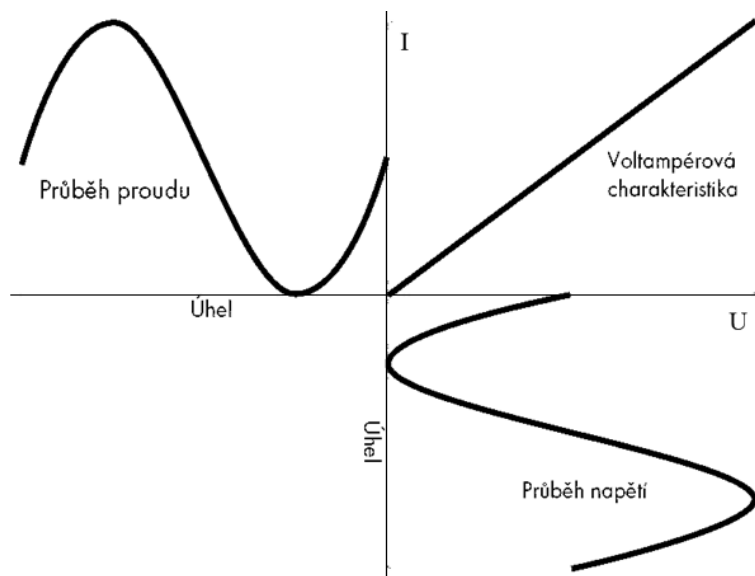
2.1.5 Nelineární spotřebiče

Označení "nelineární spotřebič" je odvozeno z Volt-Ampérové charakteristiky dané zátěže. Z hlediska V-A charakteristik lze zátěže rozdělit do dvou skupin, a to na zátěže s:

- **lineární V-A charakteristikou,**
- **nelineární V-A charakteristikou.**

Zátěže s lineární V-A charakteristikou

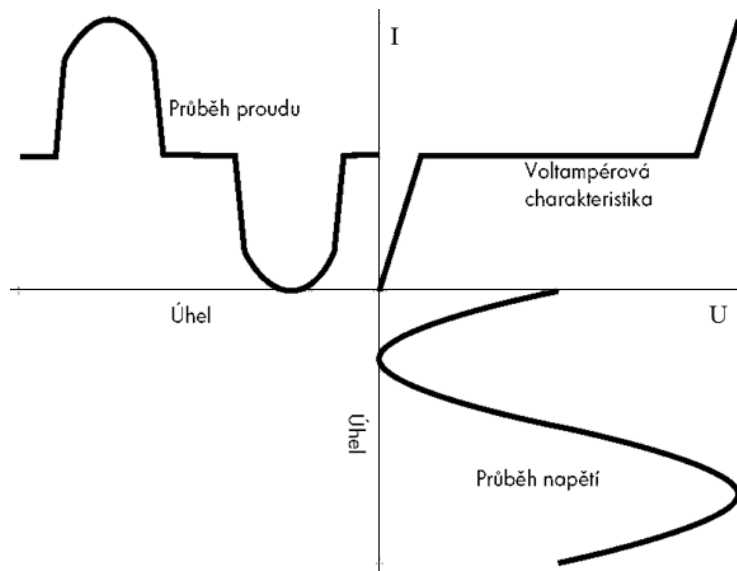
Lineární zátěže jsou tvořeny pouze lineárními prvky, jako je odpor, indukčnost a kapacita. V případě, že bude tato zátěž napájena harmonickým sinusovým napětím, bude odebíraný proud též harmonický sinusový. V případě zařazení reaktančních prvků (indukčnost či kapacita) do obvodu dojde pouze k fázovému posunu mezi napětím a proudem, čímž bude akorát ovlivněn účinník. Po aplikaci harmonické analýzy (tedy Fourierova rozkladu) by průběh proudu byl tvořen pouze základní harmonickou složkou, tj. harmonickou 1. řádu. Na Obr. 7 je znázorněna V-A charakteristika odporové lineární zátěže (bez fázového posunu) spolu s časovým průběhem napětí a proudu. [16]



Obr. 7 V-A charakteristika lineární zátěže [16]

Zátěže s nelineární V-A charakteristikou

Nelineární zátěže při napájení sinusovým harmonickým napětím odebírají nesinusový proud. Dochází k tomu tak, že obvod odebírá proud jen v určitém časovém okamžiku napájení. Na Obr. 8 je znázorněn příklad takové nelineární V-A charakteristiky, která je charakteristická např. pro dvoucestný můstkový usměrňovač s filtračním kondenzátorem. Skutečné nelineární charakteristiky mají však mnohem komplikovanější průběh. [16]



Obr. 8 V-A charakteristika nelineární zátěže [16]

Pro ukázkou, jak vypadá typický nelineární spotřebič na úrovni běžných domovních NN instalací, je níže demonstrován příklad na obyčejné 0,5W LED žárovce s vlastním zdrojem, jejíž základní parametry jsou uvedené v Tab. 2. Naměřené hodnoty byly převzaty z webu společnosti Embuilt Technologies [17], kterou bylo měření realizováno.

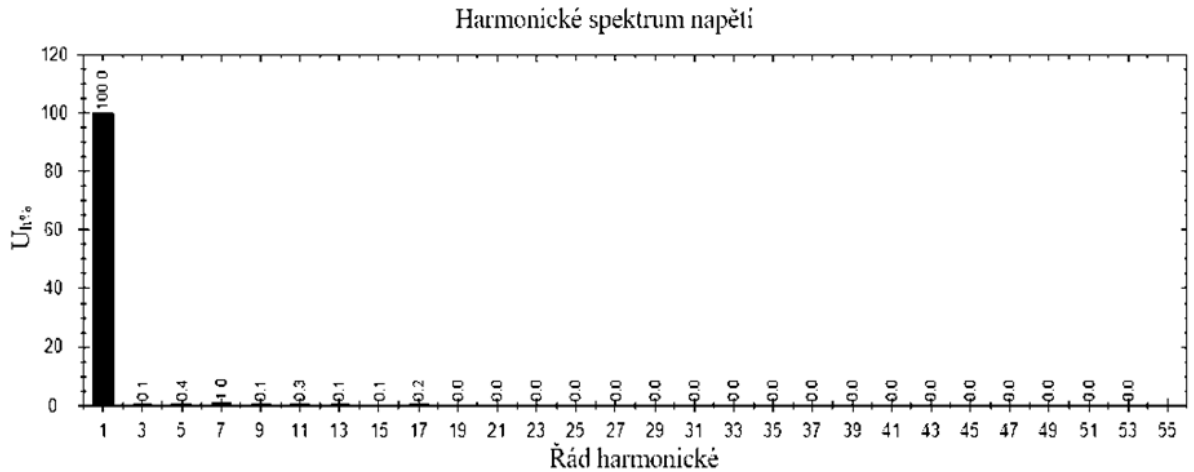
Tab. 2 Základní parametry měřené LED žárovky

| | |
|--------------------|-----------|
| U_{rms} | 227.4 V |
| I_{rms} | 0.01888 A |
| P | 0.359 W |
| $\lambda \sim$ | 0.083 |
| f | 49.91 Hz |
| THD _U % | 1.051 % |
| THD _I % | 19.55 % |

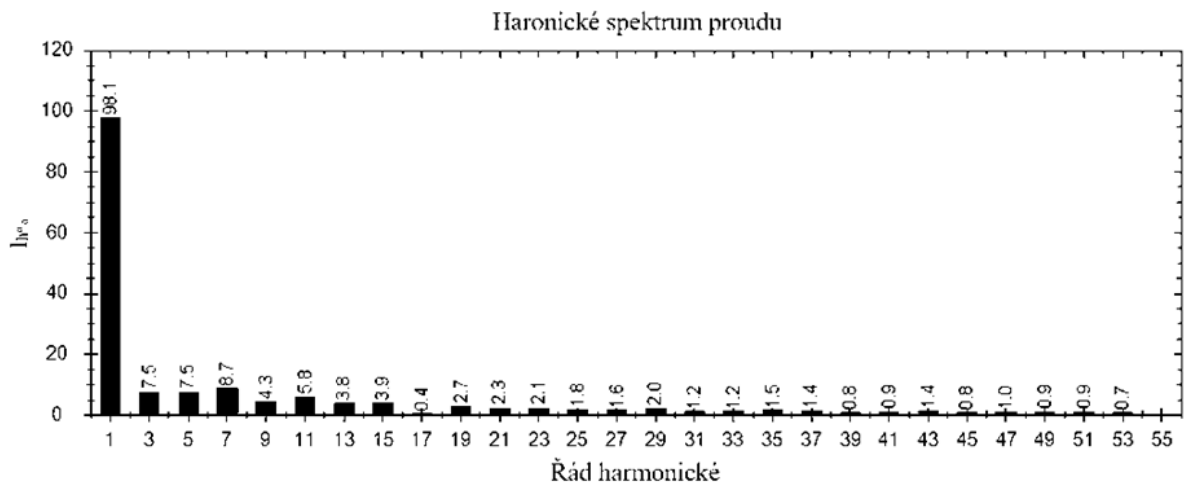
U žárovky bylo měřeno svorkové napětí U pro harmonické 1. - 53. řádu a proud protékající žárovkou taktéž pro harmonické 1. - 53. řádu. Z těchto hodnot byly vypočítány poměrné hodnoty proudu a napětí pro jednotlivé řády harmonických. Naměřené a vypočtené hodnoty těchto veličin jsou zapsány v Tab. 3. Na Obr. 9 a Obr. 10 jsou pak graficky znázorněny poměrné hodnoty napětí a proudu v procentech pro jednotlivé řády harmonických.

Tab. 3 Naměřené hodnoty

| Řád harmonické | U | $U_{h\%}$ | I | $I_{h\%}$ |
|----------------|----------|-----------|----------|-----------|
| rms | 227.40 V | | 20.00 mA | |
| 1 | 227.30 V | 99.96 % | 18.52 mA | 98.09 % |
| 3 | 0.15 V | 0.06 % | 1.41 mA | 7.47 % |
| 5 | 0.80 V | 0.35 % | 1.42 mA | 7.50 % |
| 7 | 2.20 V | 0.97 % | 1.64 mA | 8.70 % |
| 9 | 0.25 V | 0.11 % | 0.81 mA | 4.28 % |
| 11 | 0.72 V | 0.31 % | 1.09 mA | 5.77 % |
| 13 | 0.28 V | 0.12 % | 0.72 mA | 3.81 % |
| 15 | 0.14 V | 0.06 % | 0.73 mA | 3.88 % |
| 17 | 0.42 V | 0.18 % | 74.48 A | 0.39 % |
| 19 | 0.10 V | 0.05 % | 0.50 mA | 2.65 % |
| 21 | 45.75 mV | 0.02 % | 0.44 mA | 2.31 % |
| 23 | 63.75 mV | 0.03 % | 0.40 mA | 2.13 % |
| 25 | 21.53 mV | 0.01 % | 0.34 mA | 1.79 % |
| 27 | 22.03 mV | 0.01 % | 0.31 mA | 1.63 % |
| 29 | 33.30 mV | 0.01 % | 0.38 mA | 2.03 % |
| 31 | 27.75 mV | 0.01 % | 0.22 mA | 1.17 % |
| 33 | 26.91 mV | 0.01 % | 0.23 mA | 1.23 % |
| 35 | 10.26 mV | 0.00 % | 0.29 mA | 1.51 % |
| 37 | 51.13 mV | 0.02 % | 0.26 mA | 1.40 % |
| 39 | 22.70 mV | 0.01 % | 0.15 mA | 0.78 % |
| 41 | 12.44 mV | 0.01 % | 0.16 mA | 0.85 % |
| 43 | 40.36 mV | 0.02 % | 0.26 mA | 1.35 % |
| 45 | 9.76 mV | 0.00 % | 0.16 mA | 0.83 % |
| 47 | 8.41 mV | 0.00 % | 0.19 mA | 1.00 % |
| 49 | 24.39 mV | 0.01 % | 0.17 mA | 0.90 % |
| 51 | 9.42 mV | 0.00 % | 0.18 mA | 0.93 % |
| 53 | 14.97 mV | 0.01 % | 0.13 mA | 0.67 % |



Obr. 9 Harmonické spektrum napětí [17]



Obr. 10 Harmonické spektrum proudu [17]

Ze znázorněného frekvenčního spektra si lze pozorovat, že měřená LED žárovka je spotřebičem odebírající nelineární proud. Příčinou je elektronický předřadník v patici žárovky obsahující usměrňovač, vysokofrekvenční elektronický spínač, vyhlazovací kondenzátor a v ideálním případě i elementární filtr eliminující harmonické. Zajímavostí je třeba fakt, že i obyčejná wolframová žárovka je vlastně zdrojem harmonických, neboť V-A charakteristika vláknů není čistě lineární. V distribuční soustavě se však na úrovni NN vyskytuje mnohem více spotřebičů, produkující vyšší harmonické. Příklady těchto spotřebičů budou uvedeny popsány v následující kapitole 2.1.6.

2.1.6 Příklady nelineárních spotřebičů

Jednofázové spotřebiče

➤ Spínané napájecí zdroje (SMPS)

Pro napájení většiny malých zařízení na úrovni NN jsou využívány spínané napájecí zdroje nahrazující rozměrné a těžké transformátory s usměrňovačem. Síťové napájení je usměrněno standardním čtyřcestným můstkem a vyhlazeno vstupními kondenzátory. Následně je stejnosměrné napětí rozstředáno vysokofrekvenčním elektronickým spínačem a velikost napětí je následně upravena na požadovanou hodnotu transformátorem, jehož velikost může být značně redukována díky vysoké frekvenci vstupního napětí. Toto napětí je pak opět usměrněno a vyhlazeno výstupními kondenzátory. Tyto zdroje však odebírají z napájecí sítě nesinusový proud obsahující značné množství vyšších harmonických složek. Na vstupu a výstupu těchto zdrojů bývají umístěny jednoduché pasivní filtry, které však zcela nezabrání k emisi harmonických.

➤ Úsporná svítidla s elektronickým předřadníkem (CFL)

V posledním desetiletí se výrazně zvýšil počet úsporných svítidel vzhledem k jejich velké účinnosti, životnosti a následné úspoře. Postupně tak vytlačují klasické žárovky s wolframovým vláknem, jejichž prodej už je pro větší výkony legislativně omezen. Oproti klasickým žárovkám však emitují široké spektrum harmonických, které je při míře jejich používání nezanedbatelné a významně se tak tyto svítidla podílejí na harmonickém zkreslení v síti.

➤ Záložní zdroje (UPS)

Některé spotřebiče vyžadují zvýšenou spolehlivost dodávky elektrické energie, a to např. v nemocnicích či jiných provozech a instalacích vyžadující nepřetržitý provoz. V takových případech se využívají záložní zdroje, které jsou při případném výpadku schopné pracovat až desítky hodin. Jsou trvale připojeny na síť, aby byla dobíjena interní záložní baterie. Skládají se z usměrňovače sloužícího pro usměrnění vstupního nabíjecího napětí, dále z baterie, jejíž kapacita je úměrná době zálohování a ze střídače, který zajišťuje rozstředání stejnosměrného napětí z baterie následně připojeného do sítě. Právě samotný střídač na výstupu je nejvýznamnějším zdrojem harmonických.

Trojfázové spotřebiče

➤ Zařízení využívající trojfázový můstek

Mezi spotřebiče využívající pro své napájení či řízení trojfázové můstky patří zejména pohony s výkonovými elektronickými regulátory a velké UPS jednotky. Tyto můstky jsou také známé jako šestipulsní, protože na jeho stejnosměrném výstupu se vyskytuje šest pulsů za periodu. Harmonické generované tímto můstkem jsou sousední postranní pásma šesté harmonické, tj. řádu $6k \pm 1$. [5] [16]

2.1.7 Problémy způsobené vyššími harmonickými

S provozem nelineárních spotřebičů na veřejných sítích vzniká mnoho problémů ovlivňujících jak samotnou DS, tak i běžné elektroinstalace. Uvedeme si proto několik nejčastějších problémů způsobených vyššími harmonickými. Problémy mohou být způsobeny jak harmonickými proudy, tak harmonickými napětími.

Problémy způsobené harmonickými proudy

➤ Skinefekt

Je všeobecně známo, že střídavý elektrický proud je vytlačován na povrch vodiče. S rostoucí frekvencí se tento jev projevuje výrazněji, tudíž i ve vodičích protékajícími vyššími harmonickými proudy. Skinefekt je nežádoucí jev způsobující činné ztráty a je třeba ho uvažovat při dimenzování kabelů. [16]

➤ Zahřívání transformátorů

Podstatnou složkou ztrát u transformátorů tvoří ztráty vířivými proudy. Tyto vířivé proudy však rostou se čtvercem řádu vyšších harmonických, s čímž souvisí nárůst provozní teploty. Přehřívání pak může mít fatální dopad na životnost transformátorů.

Dalším problémem spojeným s průchodem vyšších harmonických proudů transformátorem se týká třetí harmonické a jejími násobky. Pokud u transformátorů s vinutím do trojúhelníka tečou harmonické proudy 3. řádu a jejich násobky, jsou ve fázi a uzavírají se ve vinutí. Tím dochází k jejich eliminaci pro další rozvod. [16]

➤ Rušení ovlivňující vybavování ochranných prvků

Téměř každá domovní či průmyslová instalace je dnes vybavena proudovým chráničem. Ten vybavuje, pokud je součet proudů ve všech fázích a v nulovém vodiči nad určitou nastavenou mezí. Průchodem vyšších harmonických proudů však může být tato vybavovací činnost narušena a může tak docházet k nežádoucím výpadkům vlivem chybného vyhodnocení poruchového stavu. Některé zařízení mají totiž v napájecím

obvodu vstupní filtry pro odrušení, zpravidla kondenzátory mezi fázemi a mezi N a PE, čímž má zařízení malý svod proti zemi. Proudů o vyšší frekvenci však mohou přes tyto kapacitní filtry protéci a tím způsobit chybné vybavení chrániče. [16]

➤ **Přetěžování kompenzačních zařízení**

Kompenzační stanice jsou vybaveny kondenzátorovými bateriemi, jež jsou dimenzovány na určité zatížení a provozní podmínky. Vlivem vyšších harmonických proudů je však snížena reaktance kondenzátorů, což může vést k jejich přetěžování. K dalšímu jevu, který se zde může objevit, patří nežádoucí rezonance mezi kapacitou kompenzační stanice a indukčností sítě. Rezonanční kmitočet může být totiž blízký kmitočtům harmonických vyšších řádů. [16]

➤ **Zatěžování nulového vodiče**

V trojfázovém rozvodu s vyvedeným nulovým vodičem se běžně uvažuje se symetrickým zatížením sítě, a tak v ideálním případě neprotéká středním vodičem žádný proud. V obvodech s harmonickými proudy však středním vodičem proud protékat může. Třetí harmonická proudů a její násobky obsahují pouze netočivou složku. Amplitudy 3k složek proudů jsou proto ve fázi a v nulovém bodě dochází k jejich součtu. Nulovým vodičem pak protéká de facto trojnásobný proud. Vzhledem k tomu, že se z ekonomických důvodů redukuje průřez nulového vodiče u kabelů, může vlivem zmíněných skutečností docházet k jeho přetěžování. [16]

➤ **Zvětšování zdánlivého výkonu**

Vlivem složek harmonických proudů dochází v soustavě ke zvyšování zdánlivého příkonu pro nelineární zátěže. To vede ke zhoršení účinnosti odebíraného výkonu a k celkovému nárůstu efektivní hodnoty proudů v síti a s tím souvisejícím nárůstem ztrát v rozvodném systému. Na tuto skutečnost je opět potřeba brát ohled při dimenzování rozvodů. [18] [19]

Problémy způsobené vyššími harmonickými napětími

➤ **Deformace průběhu napětí sítě**

Vlivem harmonických napětí v napájecí síti dochází k deformaci napěťového průběhu. Průchodem proudů o vyšší frekvenci se zvyšují úbytky napětí na impedancích sítě ovlivňujících napájecí napětí. Čím menší zkratový výkon bude síť mít, tím výrazněji bude síťové napětí deformováno příslušnými úbytky. Při návrhu nové sítě je tedy třeba s těmito úbytky počítat. [18]

➤ **Vyšší ztráty v indukčních strojích**

Nárůst těchto ztrát souvisí jako u transformátorů s vířivými proudy. Další ztráty jsou způsobeny interakcí mezi točivým magnetickým polem statoru a nežádoucím točivým polem vyvolaným harmonickými proudy. Každé z těchto polí se točí jinou rychlostí a dochází tak k nežádoucím přídavným ztrátám. [16]

➤ **Chybné vyhodnocení průchodu napětí nebo proudu nulou**

Některá zařízení využívají ke kalibraci, měření, synchronizaci či regulaci průchodu veličiny nulou. Při silně zarušeném průběhu může dojít k ovlivnění komparační úrovně a některá zařízení tak nemusí pracovat správně. [16]

2.1.8 Meziharmonické

V rozvodné síti se mimo harmonických složek základního napájecího kmitočtu objevují další kmitočty, které nejsou celočíselným násobkem kmitočtu základního. Tyto kmitočty se projevují jako nespojitě kmitočty nebo jako širokopásmové spektrum a označují se jako "meziharmonické". Dále se zavádí pojem "subharmonické", což jsou meziharmonické s kmitočtem menším, než je kmitočet základní. [20] S rozvojem průmyslové elektroniky se vliv meziharmonických značně posílil a proto je třeba se jimi zabývat při rozboru kvality el. energie. [11]

Zdroje meziharmonických

Jsou dva základní mechanismy pro generování meziharmonických. Prvním je vznik postranních pásem zdrojového napětí obsahujícím harmonické v důsledku změn velikosti harmonických či fázového úhlu. K tomuto jevu dochází při častých proudových změnách způsobujících rozkolísání napětí v síti (tzv. fluktuace). Druhým mechanismem je případ spínačů, kdy je spínaná frekvence odlišná od frekvence soustavy. To je typické např. pro konvertory a cyklokonvertory řízených PWM modulací [20]. Mezi další zdroje patří:

➤ **Obloukové pece a svařovací zařízení**

Při tavení kovové vsázky v peci je využíván elektrický oblouk vznikající mezi vsázkou a elektrodami, přičemž dochází k výrazné změně impedance. Pro vznik meziharmonických je nejvýznamnější první fáze tavení, kdy je impedance skoro nulová, proud je maximální a pokles napájecího napětí je největší. Impedance oblouku se neustále mění, což vede k fluktuaci. Svařovací zařízení také vytvářejí spojitě spektrum spojené s určitým procesem. [20]

➤ Točivé stroje

U elektrických motorů dochází ke vzniku mezipharmonických v rotorových a satorových drážkách, což je spojeno s přesycováním magnetického obvodu. V ustáleném stavu jsou nežádoucí frekvence v rozmezí 50 - 2000 Hz, ale při rozběhu se toto spektrum může výrazně rozšířit. Na generování mezipharmonických má také vliv konstrukční provedení motoru (např. nedokonalá souosost). Dalším problémem jsou stroje s proměnným zatížením, jako jsou buchary, pily, válcovací stolice, kompresory, pístová čerpadla apod. Jako příklad generátoru který může být zdrojem mezipharmonických lze uvést větrnou elektrárnu. Vzhledem ke "stínovému efektu" stožáru dochází při každém otočení větrné turbíny ke krátkodobému poklesu momentu, což může ovlivnit výsledný průběh výstupního napětí generátoru. [20]

➤ HDO

Na rozdíl od jiných zdrojů mezipharmonických je signál HDO generován do sítě záměrně za účelem spínání vybraných zařízení. Nejčastější používanou frekvencí v pro signál HDO v ČR je $216\frac{2}{3}$ Hz. Tento signál je superponován na základní kmitočet 50 Hz a jeví se jako mezipharmonická složka. Ta je zanedbatelná do té doby, než dojde k rezonanci a následnému nárůstu mezipharmonických. [11]

Problémy způsobené mezipharmonickými

V předchozí kapitole byla za jednu z příčin vzniku mezipharmonických označena fluktuace napětí. Náhodné či opakující se změny okamžité hodnoty napětí způsobené proměnným či přerušovaným odběrem jsou příčinou blikání světelných zdrojů, což se označuje pojmem flickr. Míra změn napětí závisí na typu a velikosti zátěže, průběhu odebíraného proudu a zkratovém výkonu napájecí sítě.

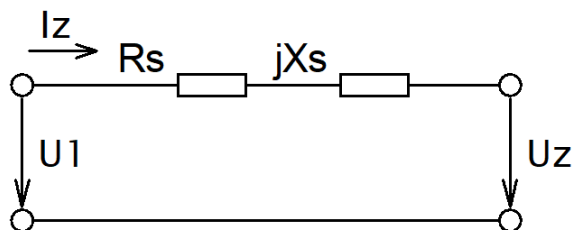
Jelikož se později ve vyhodnocení praktické části této bakalářské práce ukáže být klíčovým právě flickr, je třeba do této problematiky nahlédnout podrobněji.

Na Obr. 11 je znázorněn náhradní jednofázový obvod. Napětí na konci je oproti napětí na začátku snižené o úbytky napětí na odporu a reaktanci. Úbytek napětí lze popsat rovnicí:

$$\frac{U_1 - U_z}{U_z} \approx \frac{\Delta U}{U_z} = R_s \frac{P}{U_z^2} + X_s \frac{Q}{U_z^2} \cong R_s \frac{\Delta U}{U_z} + \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.1.32)$$

Předpokládáme, že činný odpor vedení R_s je ve srovnání s reaktancí vedení X_s zanedbatelný. Pak lze napsat rovnici popisující poměrnou hodnotu změny napětí na zátěži:

$$\frac{\Delta U}{U_z} \cong \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.1.33)$$



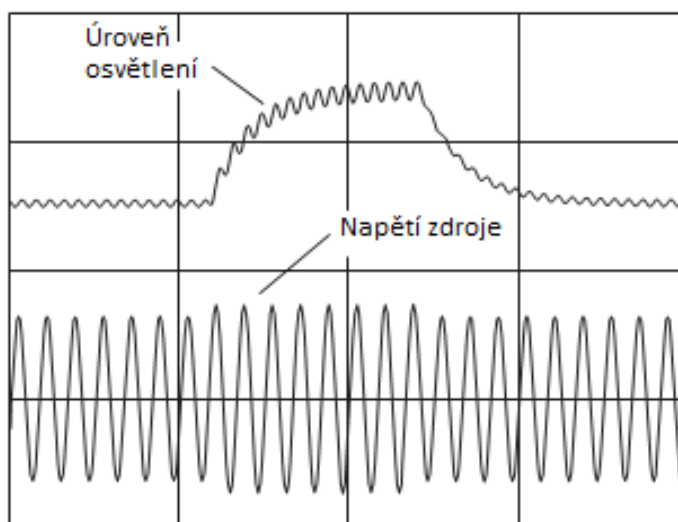
Obr. 11 Pomocný obrázek k popisu flikru

Změna napětí se projevuje jako pokles napětí o konstantní hodnotu v delším časovém intervalu, či jako rychlé změny napětí nebo jako kolísání napětí. Kolísání napětí lze popsat jako sérii změn efektivní hodnoty napětí nebo jako cyklické změny obalu průběhu napětí a lze ho popsat:

- amplitudou změn napětí,
- počtem změn napětí za definovanou jednotku času,
- následek změn napětí spojených s rušením (tzn. i s flikrem).

[5] [21]

Ze vztahu (2.1.33) je patné, že primární příčinou změn napětí je změna jalového výkonu na proměnlivé zátěži. Mezi takové zátěže větších výkonů patří např. obloukové pece, pohony pro válcovací stolice, navíječky apod. Jako proměnlivé zátěže menších výkonů lze uvést např. výtahy, kompresory, ohříváče vody, pily, el. kladiva, které mohou být taktéž zdrojem flikru. Příklad toho, jaký vliv na úroveň světelného toku obyčejné žárovky mohou mít změny napětí, je na Obr. 12.

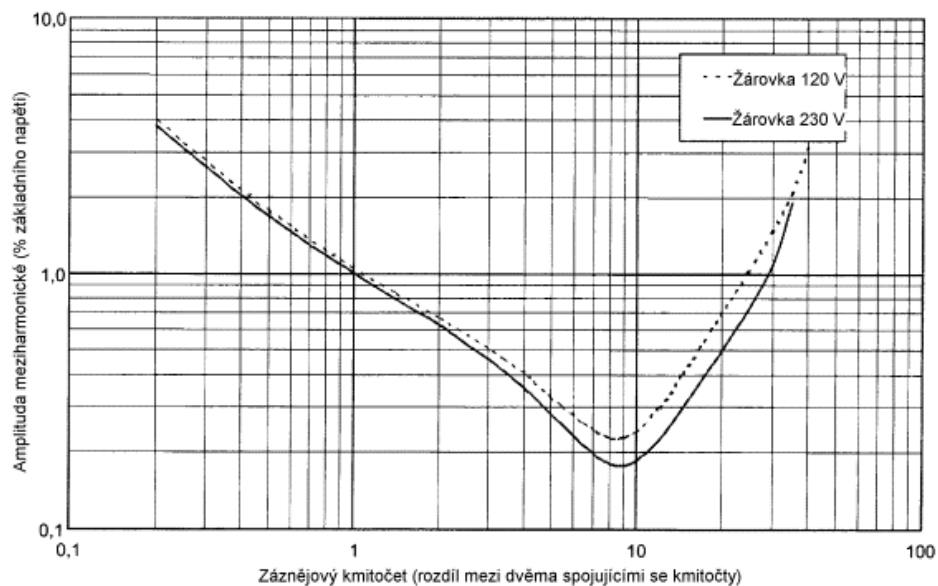


Obr. 12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky [21]

Flikr je tedy důsledkem způsobeným kolísáním napětí. Jedná se o jev, který negativně působí na zrakové vnímání člověka, jak už bylo řečeno v kap.1.2.2. Negativně se projevuje snížení zrakové pohody a s ní související únavou, jež vede ke snižování pracovního výkonu a bezpečnosti na pracovišti. Nejvyšší stav vjemu flikru je dána při napěťové změně 0,3 % odpovídající 1080 změnám za minutu, což je pro lidské oko nepříjemné nejvíce. [11] Napěťová změna $d_{\%}$ se dá určit upravením vztahu (2.1.33) do podoby:

$$d_{\%} = \frac{\Delta U}{U_z} \times 100 \quad (2.1.34)$$

Pro pravoúhlé ustálené změny napětí pro žárovku jsou přípustné fluktuace dány křivkou na Obr. 13, která odpovídá $P_{st} = 1$. Hodnoty $P_{st} > 1$ jsou nad udanou křivkou a tedy nevyhovují. Naopak hodnoty $P_{st} < 1$ jsou pod křivkou a jsou tak vyhovující. [11]



Obr. 13 Přípustné hladiny pro pravoúhlé změny napětí pro žárovku [11 str. 151]

2.2 Způsoby eliminace rušení v distribučních sítích NN

Technická zařízení k omezování vyšších harmonických jsou v dnešní době na velmi vysoké úrovni. Vzniku a šíření harmonických i přes to nelze zcela zabránit. Na začátku problému s harmonickými je vždy nejdůležitější lokální analýza sítě, ve které se harmonické vyskytují a jaké dopady v daném úseku mají. Na základě toho se poté navrhuje vhodné opatření, zejména co nejekonomičtější. Pokud míra harmonických nepřekračuje povolené meze a nemají vliv na fungování spotřebičů, nemá potom smysl instalovat finančně nákladné zařízení, jako je např. aktivní filtr. Důležité je také rozlišit, zda-li je původcem harmonického zkreslení určité zařízení, či proniká přímo z napájecí sítě. Omezování harmonických se provádí dvěma způsoby, a to buď s pomocí speciálního přídavného zařízení, či bez něj. Speciální zařízení lze pak dále dělit na aktivní a pasivní zařízení. [16]

2.2.1 Omezování harmonických bez použití přídavného zařízení

Pokud není míra zkreslení v určitém úseku sítě nějak závažná, lze harmonické omezit úpravou samotného zařízení, které je potenciálním zdrojem harmonických a původcem zvýšeného zkreslení. Jedná se o ekonomičtější variantu, která je pro některé aplikace dostačující.

➤ Zvětšení počtu fází měničů

Tímto opatřením dojde k eliminaci harmonických proudů, které měniče emitují do napájecí sítě. Lze to provést např. transformátorů se speciálním zapojením vinutí pro napájení měničů. [11]

➤ Sérioparalelní spojení usměrňovačů

Vhodným zapojením a postupným řízením usměrňovačů lze docílit snížení harmonických proudů. To lze provést např. spojením dvou šestipulsních měničů napájených z transformátoru s vinutím zapojeným v kombinaci hvězda/trojúhelník s hodinovým úhlem 1. Tím vznikne dvanáctipulsní můstek, v jehož harmonickém spektru je podstatně méně vyšších harmonických složek. Další výhodou této varianty je zlepšení účinníku a vyhlazenější průběh výstupního napětí. [11]

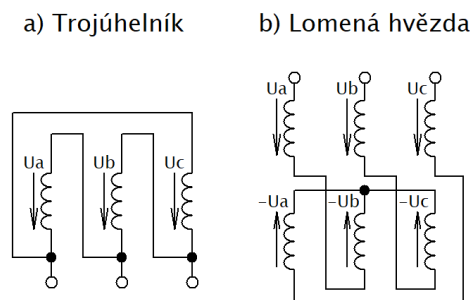
2.2.2 Omezování harmonických s použitím přídavného zařízení

Ve většině případech je pro potlačení harmonických potřebné použít přídavná zařízení. Ty se dělí do třech základních kategorií. Jsou to izolační transformátory, pasivní filtry a filtry aktivní. První jmenovaná varianta stojí zcela mimo další dvě jmenované, jelikož se pro

potlačení harmonických využívá speciální vlastnost konkrétního zapojení vinutí transformátoru. U pasivních filtrů mluvíme o tzv. filtračně kompenzačních zařízeních (FKZ), jelikož filtr harmonických je současně kompenzátořem jalového výkonu. Z hlediska principu nelze kompenzaci od filtrace oddělit. Aktivní filtry pak představují složitá elektrotechnická zařízení, které jsou tvořeny prvky výkonové elektroniky a díky pokročilému řízení je možné pokrýt širší spektrum eliminovaných harmonických. [11]

Izolační transformátory

Násobky 3. harmonické lze celkem účinně eliminovat vhodným zapojením sekundární strany napájecího transformátoru. Při zapojení transformátoru do trojúhelníka jsou 3k harmonické ve fázi, což způsobuje jejich uzavírání ve vinutí a nešíří se tak dále do sítě. Harmonické ostatních řádů však dále do sítě pronikají, což značně omezuje aplikaci tohoto opatření. Navíc je nutné počítat s vhodným dimenzováním transformátoru pro tento účel správným stanovením jmenovitého zatížení. Podobné vlastnosti má zapojení do lomené hvězdy. [16]



Obr. 14 Zapojení transformátorů pro omezení harmonických

Pasivní filtry

Pasivní filtry jsou tvořeny skupinou vhodně řazených RLC obvodů připojených do sítě jako zátěž. Každý z nich je naladěn na kmitočet příslušné harmonické, která má být eliminována. Filtr naladěný pro danou harmonickou se tak chová jako zkrat, popř. pokud je konstruován a naladěn širokopásmově, lze jej využít pro širší spektrum eliminovaných harmonických. Proud se tedy uzavírá mezi nelineárním spotřebičem a filtračním obvodem a dále v síti nepůsobí. Nelze však dosáhnout toho, aby filtr působil pouze na určitý úsek sítě, jelikož filtr může stahovat harmonické z širšího okolí. Může tak dojít k jeho přetěžování a je nutné s touto skutečností počítat při jeho návrhu. Nejslabším článkem filtru jsou právě kondenzátory, u kterých je třeba dostatečně dimenzovat jejich napěťové a proudové zatížení. [18]

Hodnoty pro dimenzování kondenzátorů se volí následovně [9]:

$$U_C \leq 1,1 U_{CN} \quad (2.2.1)$$

$$I_C \leq 1,1 I_{CN} \quad (2.2.2)$$

$$Q_C \leq 1,1 Q_{CN} \quad (2.2.3)$$

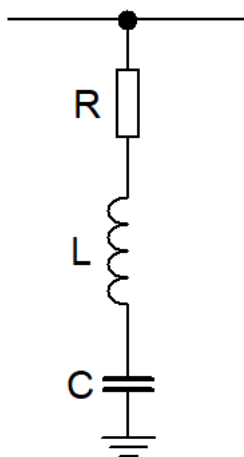
Dalším důležitým parametrem pro dimenzování kondenzátorů jsou tepelné ztráty. Nárůst teploty dielektrika vede k rychlejšímu stárnutí kondenzátoru a zkrácené životnosti. Tepelné ztráty v kondenzátoru pro první harmonickou lze popsat rovnicí [9]:

$$P_Z = U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta + U_k^2 \cdot k \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (2.2.4)$$

Pro napětí s obsahem vyšších harmonických lze upravit vztah (2.2.1) na [9]:

$$U_C = U_1 \cdot \sqrt{1 + \frac{\sum_{k=2}^{40} k \cdot U_k^2}{U_1^2}} \leq 1,1 U_{CN} \quad (2.2.5)$$

Složitější filtry se skládají s kombinace sériového a paralelního filtru. Zatím co paralelně zapojený filtr je naladěn pro svedení příslušné harmonické (pro kterou má nejnižší impedanci), sériový je naladěn tak, aby na něm byl velký úbytek harmonických napětí a harmonické proudy tak byly blokovány. Úbytek napětí se pak přes napájení objeví na zátěžích. Toto napětí by i přes své harmonické zkreslení nemělo překračovat povolené meze. Samotné sériové filtry však nelze doporučit jako obecné řešení. [16] Na Obr. 15 je znázorněn samotný paralelní filtr.



Obr. 15 Paralelní RLC filtr

Pojmem "ladění" je myšleno změna parametrů L a C pro dosažení žádoucího rezonančního kmitočtu f_r , který lze vypočítat ze vzorce:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2.6)$$

Vlivy FKZ na stabilitu napětí sítě

FKZ mají jak účinky kompenzační, tak účinky filtrační. Proto se posuzují zvlášť.

➤ Kompenzační účinky filtru

$$\rho_K = \frac{\Delta U_{1F}}{\Delta U_1} = \sqrt{\frac{I_{\dot{c}1F}^2 + I_{j1F}^2}{I_{\dot{c}1}^2 + I_{j1}^2}} \quad (2.2.7)$$

Pokud bude činná složka proudu neměnná, lze psát následující vztah:

$$\rho_K = \frac{I_{\dot{c}1F}^2 + I_{j1F}^2}{I_{\dot{c}1}^2 + I_{j1}^2} = \frac{I_{1F}}{I_1} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_{1F}} \quad (2.2.8)$$

[11]

➤ Filtrační účinky filtru

Pro zhodnocení provedené filtrace je třeba zavést příslušné koeficienty. Ty jsou pak klíčovým údajem pro porovnání s dovolenými hodnotami zkreslení napětí daného normou.

Celkový obsah harmonických:

$$HC = \sqrt{\sum_{k=2}^K Q_k^2} = \Delta U_K \quad (2.2.9)$$

Celkový úbytek napětí:

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_1^2 + \Delta U_K^2} \quad (2.2.10)$$

Zapojením FKZ se tedy úbytky napětí HC sníží. Zavádí se činitel filtrace ρ_F , který je měřítkem kvality filtrace.

$$\rho_F = \frac{U_{kF}}{U_k} = \frac{Z_{SF}}{Z_S} \quad (2.2.11)$$

Celkový činitel filtrace $\rho_{F\text{celk}}$ lze rozepsat na:

$$\rho_{F\text{celk}} = \frac{\Delta U_{KF}}{\Delta U_K} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^K U_{kF}^2}{\sum_{k=2}^K U_k^2}} \quad (2.2.12)$$

Upravením vzorce (2.2.10) dostaneme rovnici, která je klíčová po posouzení vlivu FKZ na velikost úbytku napětí.

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_{1F}^2 + \Delta U_{KF}^2} = \sqrt{(\rho_K \Delta U_1)^2 + (\rho_F \Delta U_H)^2} \leq \Delta U_P \quad (2.2.13)$$

[11]

Výhody a nevýhody pasivních filtrů

Pro volbu vhodného zařízení eliminujícího rušení v síti je dobré si uvést zásadní výhody a nevýhody pasivních filtrů. Výhodami těchto filtrů je jejich jednoduchá konstrukce, snadné naladění na místě aplikace a cena ve srovnání s jinými způsoby filtrace. Jako nevýhody lze uvést fakt, že vlastnosti filtrace jsou závislé na naladění filtru, přičemž změnou parametrů filtru je změněn rezonanční kmitočet, dále že parametry zátěže a sítě mají vliv na vlastnosti filtrace, menší účinnost a v neposlední řadě nebezpečí vzniku rezonancí při určitých jevech v síti a náchylnost na spínací operace v síti. [9]

Aktivní filtry

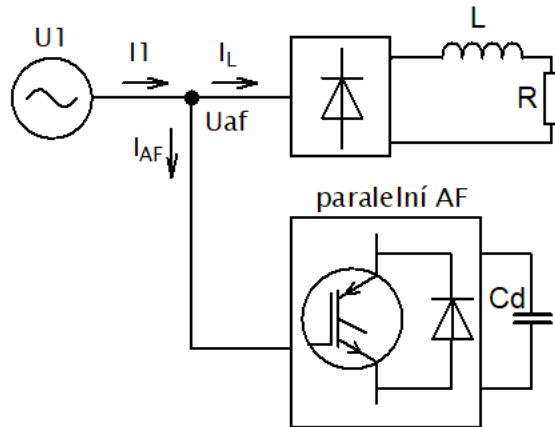
V některých rozvodech je výskyt harmonických v síti málo předvídatelný. Děje se tak zejména v administrativních budovách a IT objektech, kde dochází k nepředvídatelným změnám zařízení, emitujících harmonické. V takových případech je výhodné použít filtrační zařízení, které je schopné na tyto změny pružně reagovat. Aktivní filtry, neboli síťové kondicionéry, jsou pro takové aplikace vhodným řešením. Základní princip spočívá v generování "zbytkového" průběhu napětí nebo proudu, jež je v reálném čase s opačnou fází přičítán ke zkreslenému průběhu s obsahem harmonických. Tím jsou napětí a proud vyhlazeny téměř na čistě sinusový průběh. [16]

Mohou plnit funkci kompenzátoru jalového výkonu, harmonických, napěťové nesymetrie, flikru, velikosti napětí a kmitočtu. Díky vysoce výkonným polovodičovým spínačům (IGBT) a pokročilým metodám řízení lze aktivní filtry uplatnit až na hladinách VN a VVN. [9]

➤ Paralelní aktivní filtr

Je tvořen řízeným generátorem proudu připojeným paralelně k zátěži, ve kterém je vytvořena shodná složka harmonického proudu. Tato složka je následně zavedena do sítě v opačném směru a výsledný proud je tak kompenzován o vyšší harmonické složky proudu. Dojde tak k filtraci proudu odebíraného ze sítě nelineárním spotřebičem a nežádoucích deformací napětí a je tak kompenzován i deformační výkon. [11]

Podle okamžitého obsahu harmonických v síti je aktivní filtr schopen reagovat a dodat potřebné složky proudu, a to bez rizika nežádoucích rezonancí. Jsou zde však poměrně vysoké nároky na řídicí systémy z hlediska hardwaru i softwaru, kdy by pro úplné vyhlazení průběhu proudu bylo značně nákladné. Proto jsou harmonické proudy povětšinou filtrovány do přijatelných mezí. [11] Schematicky je paralelní aktivní filtr a jeho zapojení do sítě znázorněno na Obr. 16.

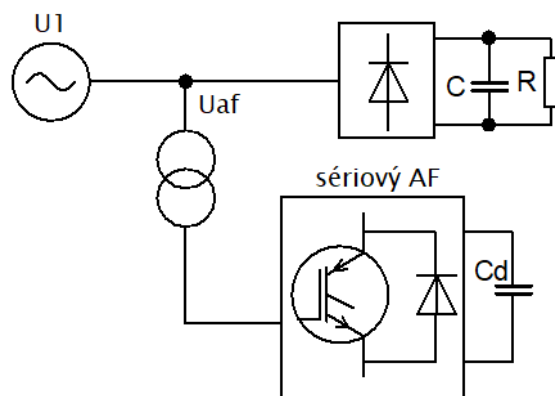


Obr. 16 Paralelní aktivní filtr a jeho zapojení do sítě [9 str. 61]

➤ **Sériový aktivní filtr**

Oproti paralelnímu AF je sériový AF vybaven generátorem napětí a je zapojen mezi spotřebiči a rozvodnou sítí. Filtr tak upravuje přiváděné napětí na žádoucí tvar. Má schopnost udržovat amplitudu napětí, eliminovat kolísání napětí a harmonické a udržet napěťovou symetrii. Zatímco u paralelního filtru jsou eliminovány rušivé účinky nelineární zátěže, sériové filtry upravují síť směrem od napájecí strany k zátěži, a tím je dodávána kvalitnější energie pro napájenou skupinu spotřebičů. Oba způsoby připojení lze však kombinovat a docílit tak požadovaných vlastností filtrace. [11]

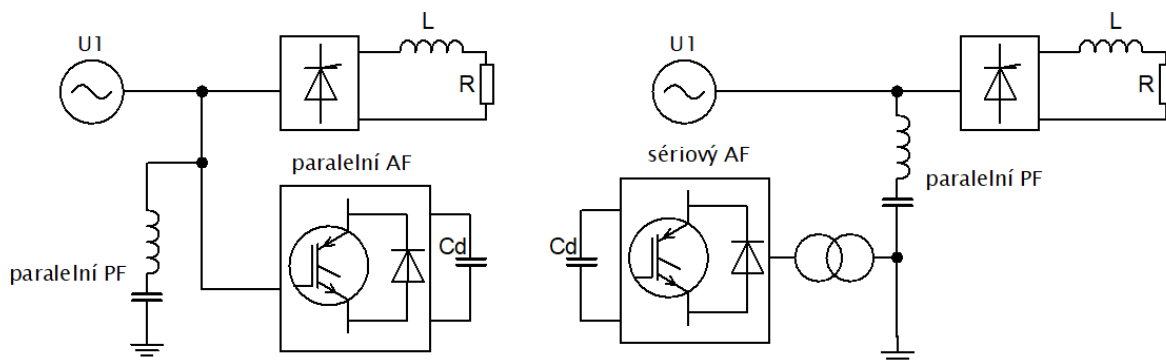
Ovládací obvod je složen ze tří nezávisle ovládaných tranzistorových můstků, přičemž zde nejsou takové nároky na řízení, jako u paralelních filtrů. Pokud však bude po filtru vyžadována úprava tvaru napětí v reálném čase, nároky na výpočetní výkon opět značně vzrostou. Dále je třeba dbát na možnost průchodu signálu HDU filtrem ke spotřebiči. [11] Sériový aktivní filtr a jeho zapojení do sítě je znázorněn na Obr. 17.



Obr. 17 Sériový aktivní filtr a jeho zapojení do sítě [9 str. 62]

➤ Kombinovaný aktivní filtr

Jak už název napovídá, jedná se filtrační zařízení kombinované z aktivních a pasivních filtrů. Zejména při větších výkonech je toto zařízení optimálním řešením spojující efektivitu filtrace a ekonomičnost. Různé varianty kombinovaného filtru a jejich zapojení je na Obr. 18.



Obr. 18 Kombinované filtry [9 str. 63]

Výhody a nevýhody aktivních filtrů

U aktivních filtrů odpadá oproti pasivním filtrům nutnost ladění, jelikož už ze samotného principu činnosti zařízení probíhá ladění automaticky dle zadaných parametrů a aktuálního stavu sítě. Tím jsou sníženy náklady inženýrského řešení. Další výhodou je jejich široké spektrum použití, kdy je lze využít nejen pro samotnou filtraci harmonických proudů a napětí, ale i pro kompenzaci jalového výkonu, napěťové nesymetrie či pro kompenzaci proudu v nulovém vodiči. [11]

Aktivní filtry mají nepochybně vyšší účinnost filtrace vzhledem k jejich dynamickému přizpůsobování. S tím ovšem souvisí vysoké nároky na výpočetní výkon řídicího systému zařízení, což aktivní filtry prodražuje. Z technicko-ekonomického hlediska je vždy nutné zvážit použití takového zařízení. [9]

Pro některé aplikace může být výhodné použití kombinovaných filtrů, kde jsou využity pozitivní vlastnosti aktivních a pasivních filtrů dohromady. Pokud nejsou vysoké nároky na provedenou filtraci, pro výkony do 5 MVA se bude jednat o optimální řešení kombinující efektivitu filtrace a cenu. Výkonové dimenzování kombinovaných filtrů se pohybuje mezi hodnotami 5 - 8 % jmenovitého výkonu zátěže. [9]

2.2.3 Prostředky pro omezení kolísání napětí

Nejjednodušším a nejefektivnějším způsobem pro omezení kolísání napětí je zvýšení zkratového výkonu v daném místě sítě. Tímto způsobem lze omezit též kolísání napětí vyvolané změnami činného a jalového výkonu. Způsoby zvětšení zkratového výkonu jsou:

- zvětšení průřezu přívodního vedení,
- zvětšení výkonu napájecího transformátoru,
- připojení nového zdroje do úseku sítě (MVE, FVE apod.),
- zmenšení impedance vedení sériovou kompenzací,
- přepojení do vyšší napěťové hladiny.

Kolísání napětí lze dále omezit přímo u samotného zařízení, které výkyvy způsobuje. Lze to realizovat např. vhodným časovým rozvrhnutím provozu příslušných zařízení. Pokud to není možné, je třeba provést patřičná technická opatření, což např. pro motory může být jakákoliv forma softstartu ve formě speciálně vinuté kotvy pro měkký rozběh nebo elektronický softstartér.

Kolísání napětí způsobuje flickr, tedy blikání světelných zdrojů negativně působící na zrakové vnímání člověka. Lze jej mj. eliminovat použitím vhodných svítidel, které jsou vůči poklesům napájecího napětí odolnější. Mezi takové světelné zdroje patří některé druhy trubicových zářivek s CFL zdrojem. [9]

Praktická část

3 Měření kvality elektrické energie a jeho vyhodnocení

3.1 Úvod měření

V rámci této části bakalářské části byla měřena kvalita elektrické energie ve spolupráci se společností PREdistribuce, a.s. Pro místo měření byla vybrána oblast s potenciálním výskytem rušení v distribuční síti, konkrétně městská čtvrť Hodkovičky městské části Praha 4. V této čtvrti se vyskytují především obytné, sportovní a společenské objekty a školy. Není zde situován žádný větší průmyslový objekt ani administrativní centrum.

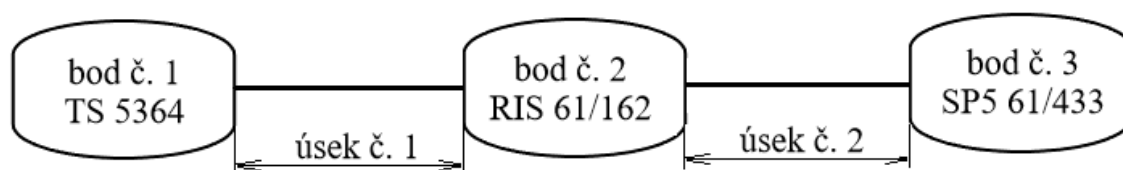
Měření proběhlo dle normy ČSN EN 61000 4-30 (Zkušební a měřicí technika - Metody měření kvality energie) a je popsán též v příloze 3 PPDS. Měřené parametry kvality elektrické energie a jejich přípustné meze jsou uvedeny v ČSN EN 50160 (viz kap.1.2). Podle této normy byly naměřené hodnoty analyzovány a vyhodnoceny. Měření probíhalo 1 týden a hodnoty byly odečítány v 10ti minutových intervalech.

3.2 Použité přístroje a software

Pro měření kvality elektrické energie byly použity přenosné analyzátoři MEG 30 PQ výrobce MEGA - Měřicí Energetické Aparáty, a.s. Pro měření impedance jednotlivých kabelových smyček byl použit digitální měřič impedance ZEROLINE 60 od výrobce ILLKO, s.r.o. Pro zpracování dat a následné vyhodnocení byl použit software PQ monitor. Tento software slouží pro vyhodnocení naměřených dat v souladu s normou ČSN EN 50160.

3.3 Popis měřících bodů

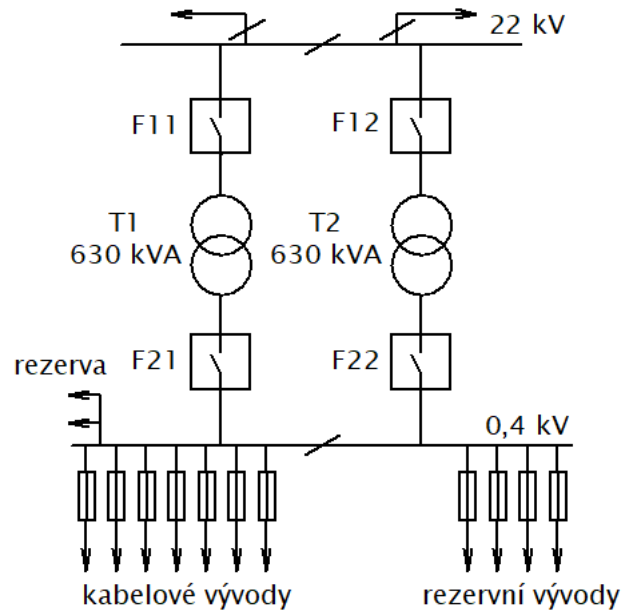
Měření bylo provedeno pro dva úseky kabelového vedení paprskově uspořádané sítě. První měřící bod byl v samotné trafostanici, tedy na začátku kabelového vedení, druhý a třetí bod pak v RIS na konci každého úseku. Stávající rozvod je proveden kabelem AYKY 3x120+70.



Obr. 19 Měřící body a kabelové úseky

Měřicí bod č. 1 - TS 5364

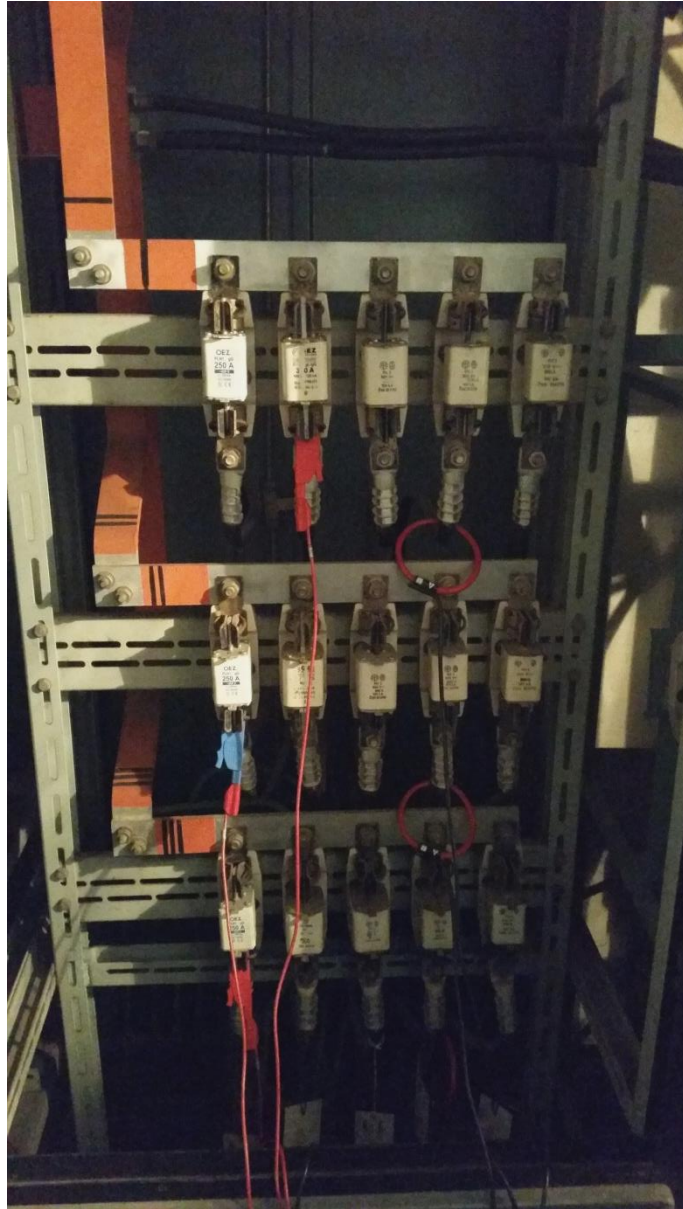
Jedná se o prostor v objektu samotné trafostanice 22/0,4 kV s označením TS 5364. Ve stanici jsou umístěny dva distribuční transformátory. Jeden transformátor byl v chodu a druhý sloužil jako rezervní. TS dále obsahuje rozvaděč VN a rozvaděče NN. Elektrická energie je do TS přiváděna VN kabely. Měřicí zařízení bylo nainstalováno do rozvodné skříně NN příslušného kabelového vývodu.



Obr. 20 Schéma rozvodny TS 5364

Tab. 4 Parametry transformátoru v TS 5364

| | |
|-----------------------|-----------|
| Výkon transformátoru | 630 kVA |
| Způsob chlazení | suché |
| Převod (transformace) | 22/0,4 kV |
| Napětí nakrátko | 5,99 % |
| Hodinový úhel | Dyn1 |
| Ztráty nakrátko | 6,79 kW |
| Ztráty naprázdno | 1,84 kW |
| Proud naprázdno | 0,91 % |



Obr. 21 Rozvodná skříň NN a připojení měřícího zařízení

Kabelový úsek č. 1 a měřicí bod č. 2

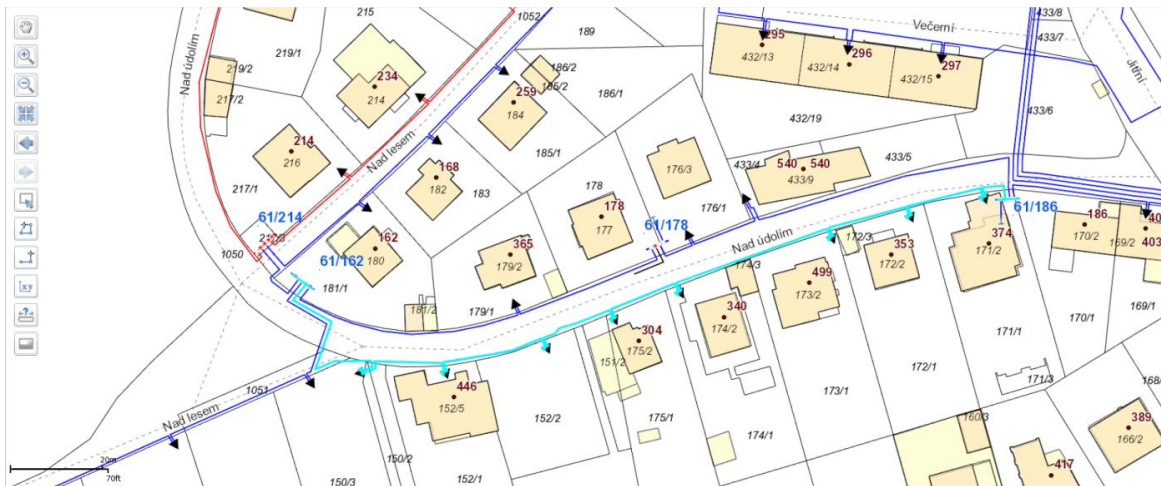
Jedná se o úsek kabelového vedení od trafostanice TS 5364 až po RIS 61/162, ve kterém je současně druhý měřicí bod. Na mapě je tento úsek zvýrazněn tyrkysovou barvou. V RIS 61/186 je tento úsek rozdělen na dvě podružné části (viz Obr. 22 a Obr. 23).

Tab. 5 Parametry úseku č. 1

| | |
|--------------|----------------|
| Délka vedení | 408,7 m |
| Z_{L1} | 0,158 Ω |
| Z_{L2} | 0,150 Ω |
| Z_{L3} | 0,169 Ω |



Obr. 22 Úsek 1 - 1. část



Obr. 23 Úsek 1 - 2. část



Obr. 24 RIS 61/162 a připojené měřicí zařízení

Kabelový úsek č. 2 a měřicí bod č. 3

Jedná se o úsek kabelového vedení od RIS 61/162 po přípojkovou skříň SP5-61/433. V přípojkové skříni je třetí a současně poslední měřicí bod. Na mapě z Obr. 25 je tento úsek zvýrazněn tyrkysovou barvou.

Tab. 6 Parametry úseku č. 2

| | |
|---------------------|----------------|
| Délka vedení | 362,0 m |
| Celková délka od TS | 770,7 m |
| ZL1 | 0,280 Ω |
| ZL2 | 0,281 Ω |
| ZL3 | 0,297 Ω |



Obr. 25 Úsek č. 2

3.4 Měření

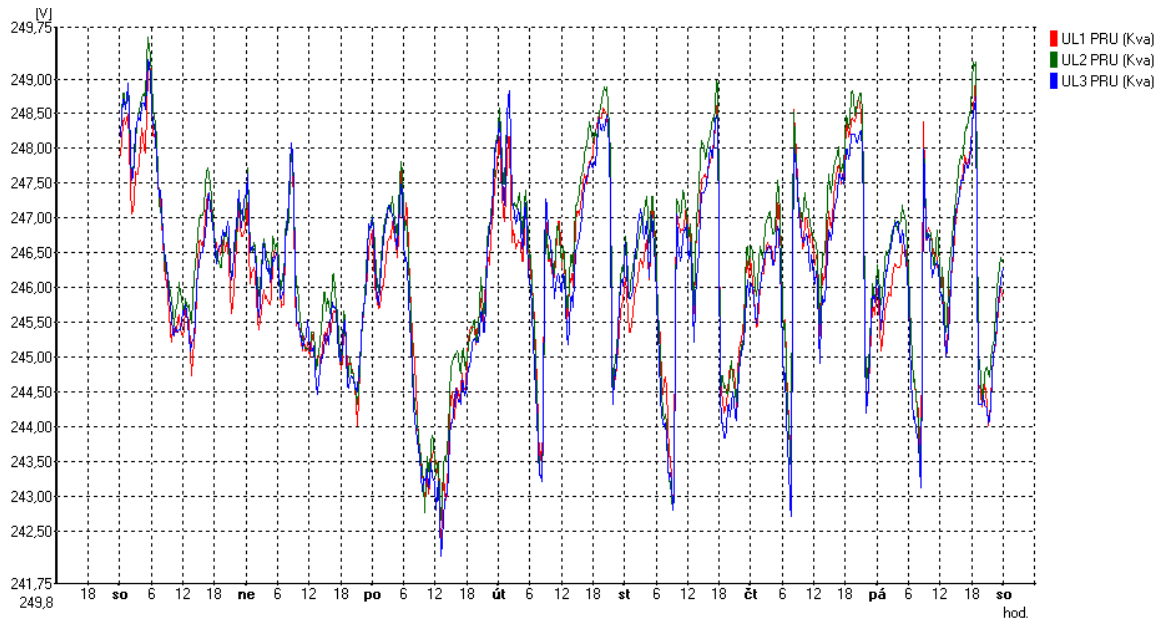
Bod č. 1 - TS 5364

Všechny naměřené hodnoty byly v povolených mezích a vyhověly jak z hlediska PPDS, tak i ČSN EN 50160. Během celé doby měření nedošlo k žádným mimořádným událostem, poklesům či přerušení napětí. Celkem bylo dodáno 4428,63 kWh energie. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v Tab. 7 a v grafech 1 - 4.

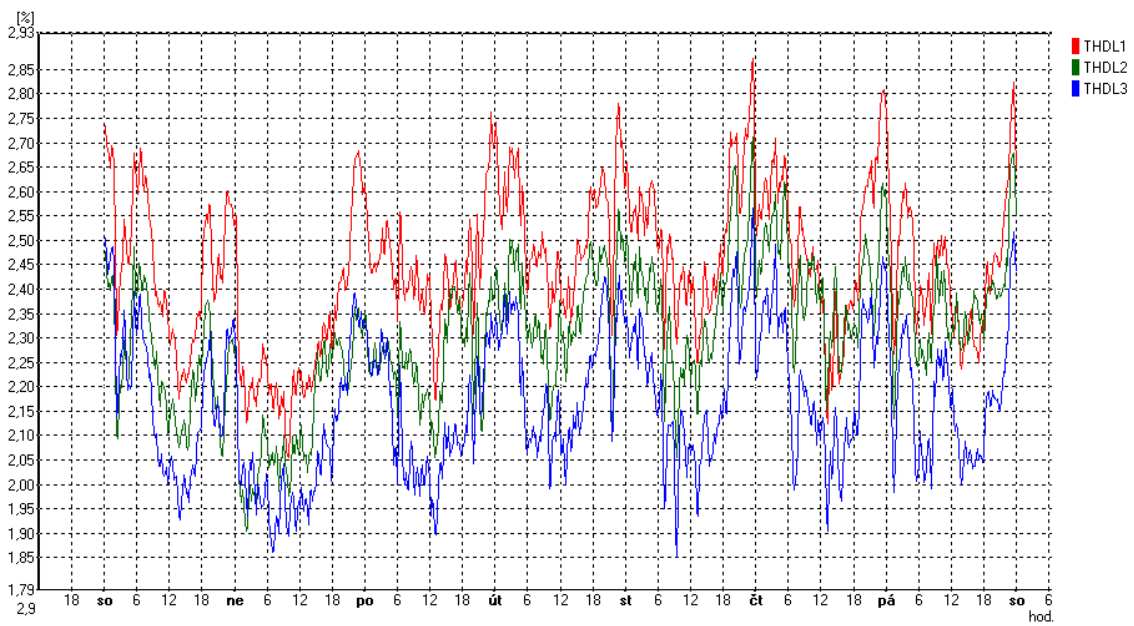
Tab. 7 Naměřené hodnoty pro měřicí bod č.1 - TS5364

| DOBA | Od | Do |
|-----------------------|---------------|--------------------|
| Doba zpracování | 13.5.2017 | 20.5.2017 |
| VELIČINA | EN 50160 | HODN./Mimo mez) |
| Délka měření | 1 týden | 7d 00:00:00,000 |
| Interval záznamu | 10 minut | 10 min |
| Frekvence 99.5 % roku | 50 Hz +1% -1% | 49,96 - 50,06 / 0% |
| Frekvence 100 % roku | 50 Hz +4% -6% | 49,96 - 50,07 / 0% |
| Nesymetrie 95 % | 2,00% | 0,04 - 0,28 / 0% |

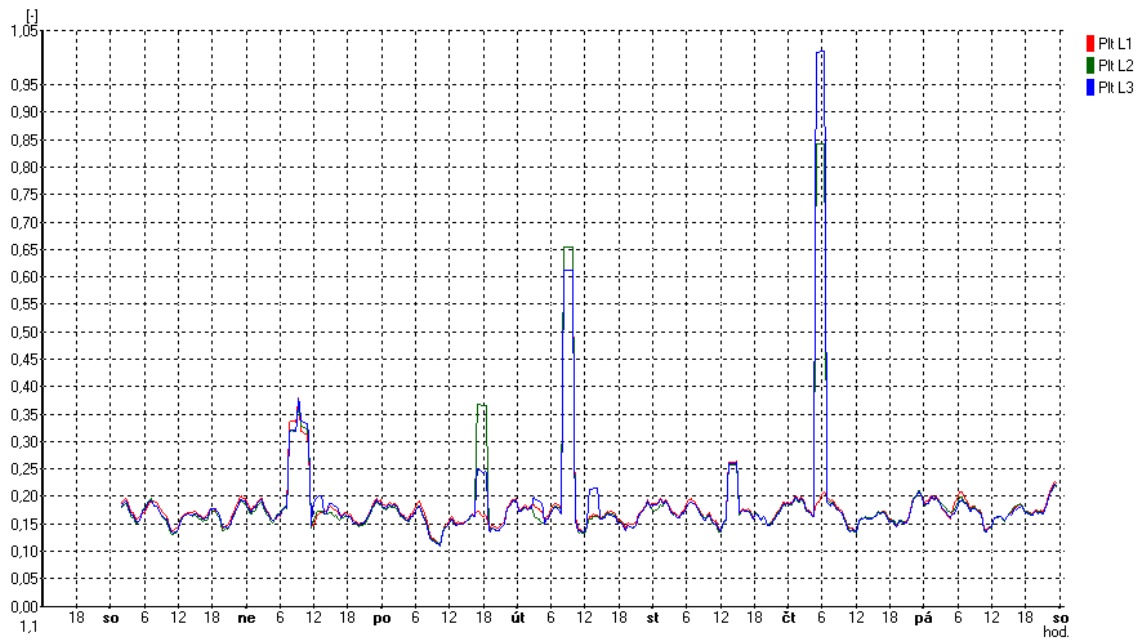
| VELIČINA | EN 50160 | L1 | L2 | L3 |
|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Napětí 95 % | 230V +10% -10% | 242,0 - 248,3 / 0% | 242,3 - 248,6 / 0% | 241,9 - 248,3 / 0% |
| Napětí 100 % | 230V +10% -15% | 242,0 - 249,2 / 0% | 242,3 - 249,6 / 0% | 241,9 - 249,3 / 0% |
| Flikr Plt 95 % | 1 | 0,11 - 0,22 / 0% | 0,11 - 0,32 / 0% | 0,11 - 0,26 / 1,2% |
| THD 95 % | 8,00% | 2,04 - 2,71 / 0% | 1,88 - 2,53 / 0% | 1,81 - 2,41 / 0% |
| 2.harmonická 95 % | 2,00% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,10 - 0,15 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 3.harmonická 95 % | 5,00% | 0,30 - 0,65 / 0% | 0,40 - 0,80 / 0% | 0,25 - 0,70 / 0% |
| 4.harmonická 95 % | 1,00% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 5.harmonická 95 % | 6,00% | 1,40 - 2,30 / 0% | 1,20 - 2,10 / 0% | 1,20 - 2,00 / 0% |
| 6.harmonická 95 % | 0,50% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% |
| 7.harmonická 95 % | 5,00% | 0,90 - 1,55 / 0% | 0,85 - 1,50 / 0% | 0,80 - 1,45 / 0% |
| 8.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 9.harmonická 95 % | 1,50% | 0,05 - 0,30 / 0% | 0,15 - 0,35 / 0% | 0,15 - 0,40 / 0% |
| 10.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 11.harmonická 95 % | 3,50% | 0,00 - 0,25 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,20 / 0% |
| 12.harmonická 95 % | 0,50% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| 13.harmonická 95 % | 3,00% | 0,05 - 0,35 / 0% | 0,00 - 0,40 / 0% | 0,00 - 0,35 / 0% |
| 14.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| 15.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,15 / 0% | 0,05 - 0,20 / 0% | 0,05 - 0,15 / 0% |
| 16.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 17.harmonická 95 % | 2,00% | 0,05 - 0,15 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,15 / 0% |
| 18.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 19.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% |
| 20.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 21.harmonická 95 % | 0,50% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| 22.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 23.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| 24.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 25.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| HDO_217 99% dne | 9,00% | 0,1 - 0,7 | 0,1 - 0,7 | 0,1 - 0,7 |



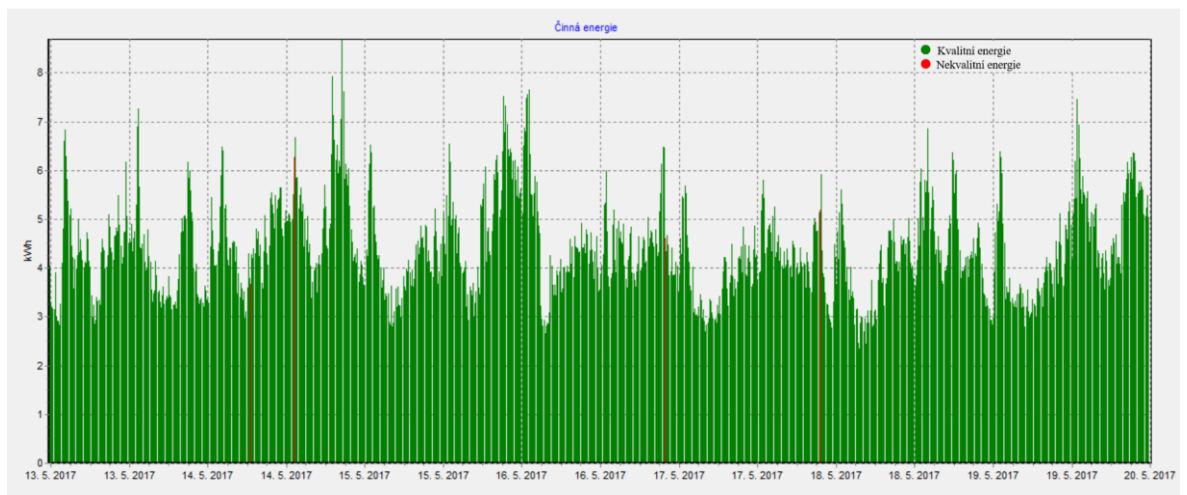
Graf 1 Napětí pro 100 % času v bodě 1



Graf 2 THDu pro 95 % času v bodě 1



Graf 3 Dlouhodobý faktor blikání P_{st} po 95% času v bodě 1



Graf 4 Celková dodaná energie v bodě 1

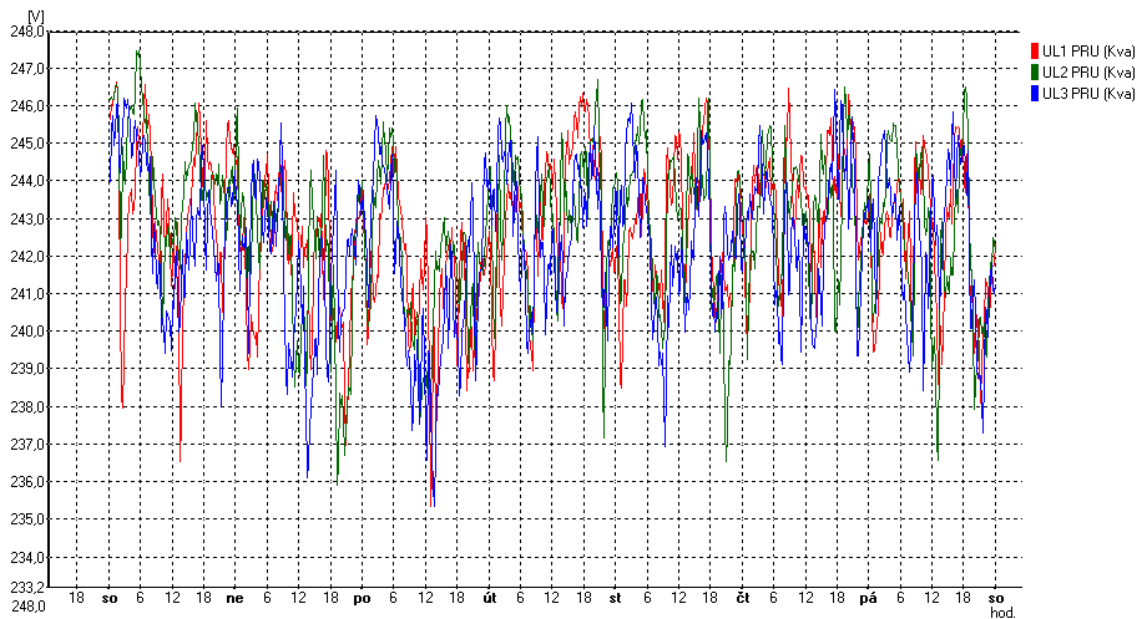
Bod č. 2 - RIS 61/162

Oproti bodu 1 je zde u grafu napětí patrné méně symetrické zatížení jednotlivých fází - napětí více kolísá. Pro fázi L1 se výrazněji projevuje flickr - po většinu dne se pohyboval kolem hodnoty 0,6. Ani jedna z naměřených veličin však nepřekročila povolené meze. Všechny hodnoty tak z hlediska ČSN EN 50160 v tomto bodě vyhověly. Celkem bylo dodáno 3076,77 kWh energie. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v Tab. 8 a v grafech 5 - 8.

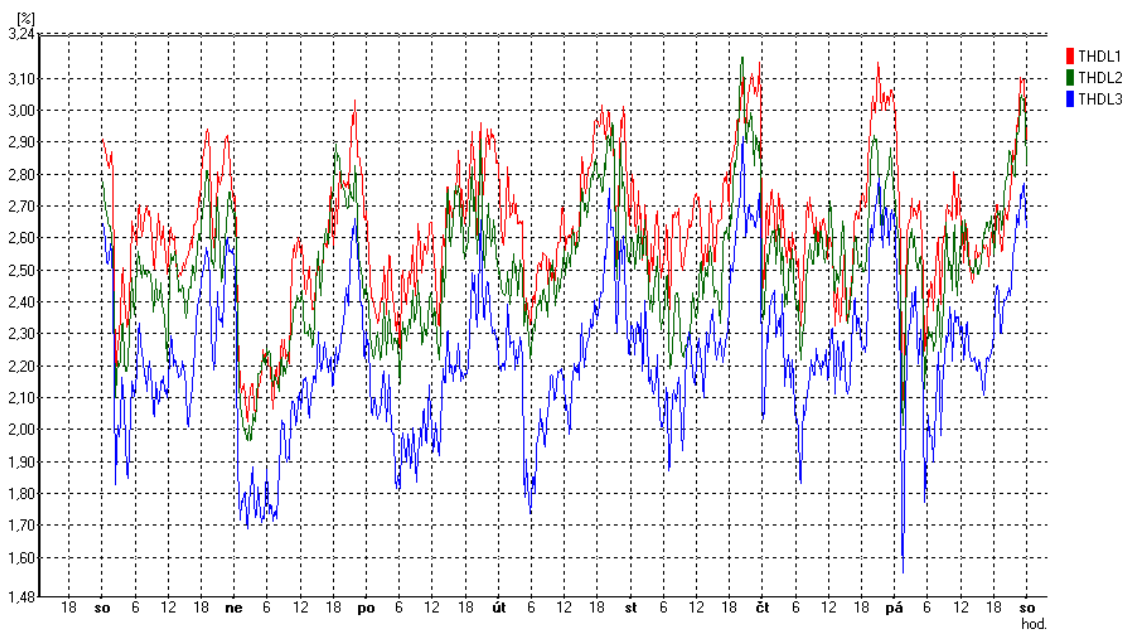
Tab. 8 Naměřené hodnoty pro měřicí bod č.2 - RIS 161/62

| DOBA | Od | Do |
|-----------------------|---------------|--------------------|
| Doba zpracování | 13.5.2017 | 20.5.2017 |
| VELIČINA | EN 50160 | HODN./Mimo mez) |
| Délka měření | 1 týden | 7d 00:00:00,000 |
| Interval záznamu | 10 minut | 10 min |
| Frekvence 99.5 % roku | 50 Hz +1% -1% | 49,95 - 50,06 / 0% |
| Frekvence 100 % roku | 50 Hz +4% -6% | 49,95 - 50,06 / 0% |
| Nesymetrie 95 % | 2,00% | 0,07 - 0,53 / 0% |

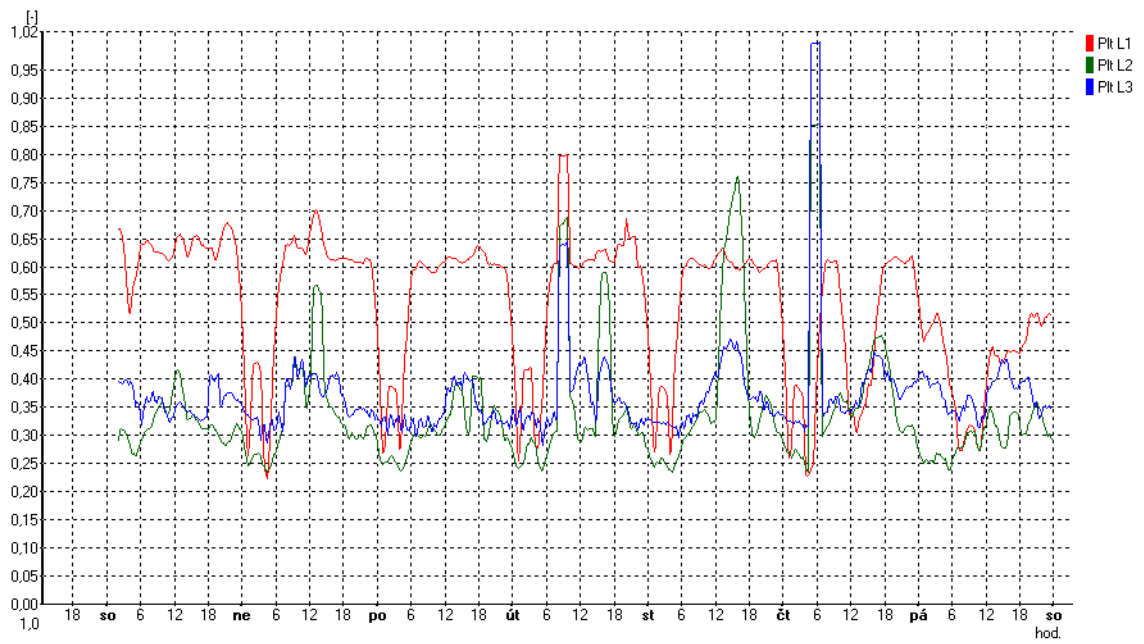
| VELIČINA | EN 50160 | L1 | L2 | L3 |
|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Napětí 95 % | 230V +10% -10% | 233,5 - 245,7 / 0% | 234,7 - 245,9 / 0% | 234,6 - 245,5 / 0% |
| Napětí 100 % | 230V +10% -15% | 233,5 - 247,1 / 0% | 234,7 - 247,7 / 0% | 234,6 - 246,6 / 0% |
| Flikr Plt 95 % | 1 | 0,22 - 0,66 / 0% | 0,23 - 0,59 / 0% | 0,28 - 0,45 / 0,1% |
| THD 95 % | 8,00% | 2,00 - 3,01 / 0% | 1,92 - 2,88 / 0% | 1,51 - 2,66 / 0% |
| 2.harmonická 95 % | 2,00% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,10 - 0,15 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 3.harmonická 95 % | 5,00% | 0,85 - 1,60 / 0% | 0,95 - 1,70 / 0% | 0,75 - 1,40 / 0% |
| 4.harmonická 95 % | 1,00% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 5.harmonická 95 % | 6,00% | 1,10 - 2,30 / 0% | 0,85 - 2,10 / 0% | 0,65 - 1,95 / 0% |
| 6.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 7.harmonická 95 % | 5,00% | 0,65 - 1,50 / 0% | 0,50 - 1,40 / 0% | 0,45 - 1,35 / 0% |
| 8.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 9.harmonická 95 % | 1,50% | 0,05 - 0,55 / 0% | 0,10 - 0,65 / 0% | 0,05 - 0,65 / 0% |
| 10.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 11.harmonická 95 % | 3,50% | 0,05 - 0,45 / 0% | 0,00 - 0,20 / 0% | 0,05 - 0,40 / 0% |
| 12.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 13.harmonická 95 % | 3,00% | 0,15 - 0,50 / 0% | 0,05 - 0,55 / 0% | 0,00 - 0,45 / 0% |
| 14.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 15.harmonická 95 % | 0,50% | 0,00 - 0,20 / 0% | 0,00 - 0,20 / 0% | 0,05 - 0,20 / 0% |
| 16.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 17.harmonická 95 % | 2,00% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,20 / 0% | 0,00 - 0,20 / 0% |
| 18.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 19.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,20 / 0% | 0,00 - 0,15 / 0% |
| 20.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 21.harmonická 95 % | 0,50% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% |
| 22.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 23.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| 24.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 25.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% |
| HDO_217 99% dne | 9,00% | 0,1 - 0,7 | 0,1 - 0,7 | 0,1 - 0,6 |



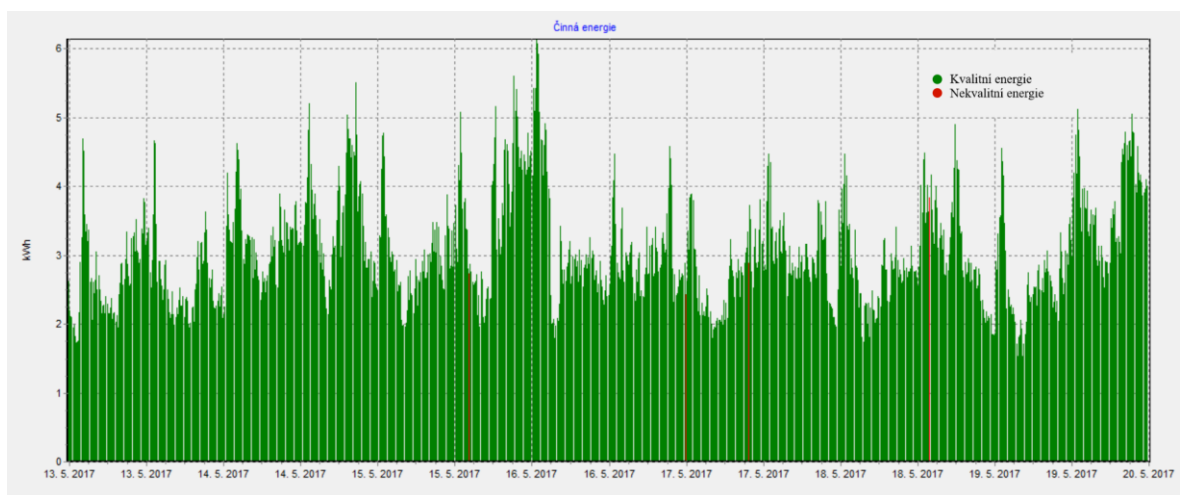
Graf 5 Napětí pro 100 % času v bodě 2



Graf 6 THDu pro 95 % času v bodě 2



Graf 7 Dlouhodobý faktor blikání Plt po 95 % času v bodě 2



Graf 8 Celková dodaná energie v bodě 2

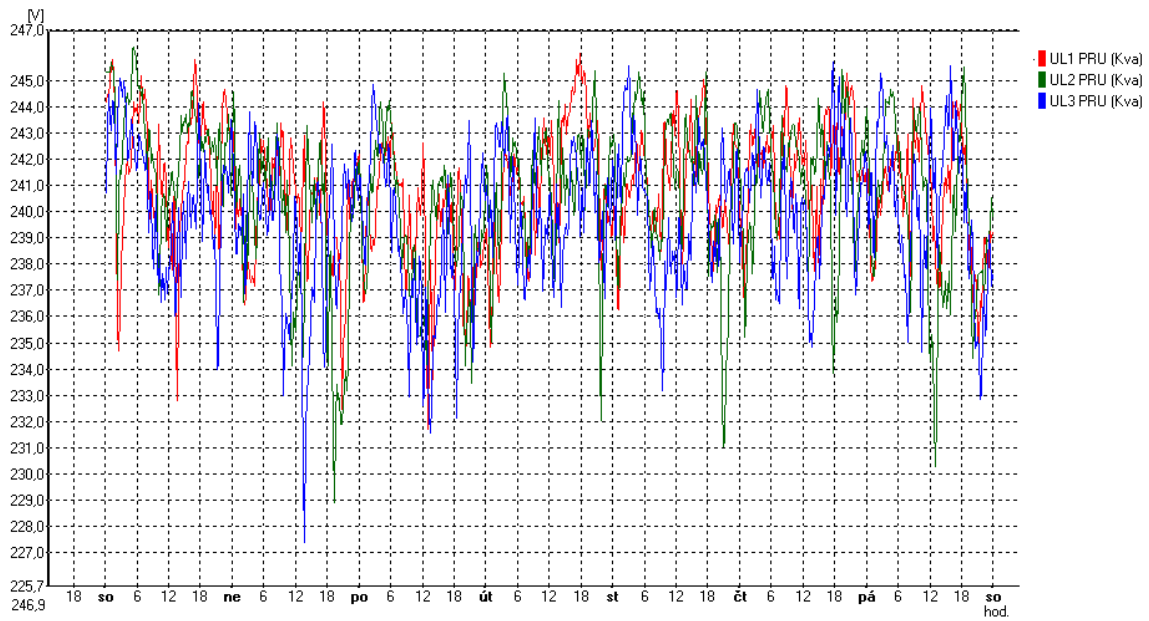
Bod č. 3 - SP5-61/433

V tomto bodě nebyly do měřicího zařízení nainstalovány proudové sondy, tudíž není možné vyhodnotit celkovou dodanou energii, jako v předchozích případech. Pro posouzení kvality jsou údaje získané z napěťových sond dostačující. Pro fázi L1 byla překročena povolená mez pro flickr o 56,6 %. Ostatní z naměřených veličin nepřekročily povolené meze. Z hlediska ČSN EN 50160 však nebylo splněno kritérium kvality dodávané elektrické energie. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v Tab. 9 a v grafech 9 - 11.

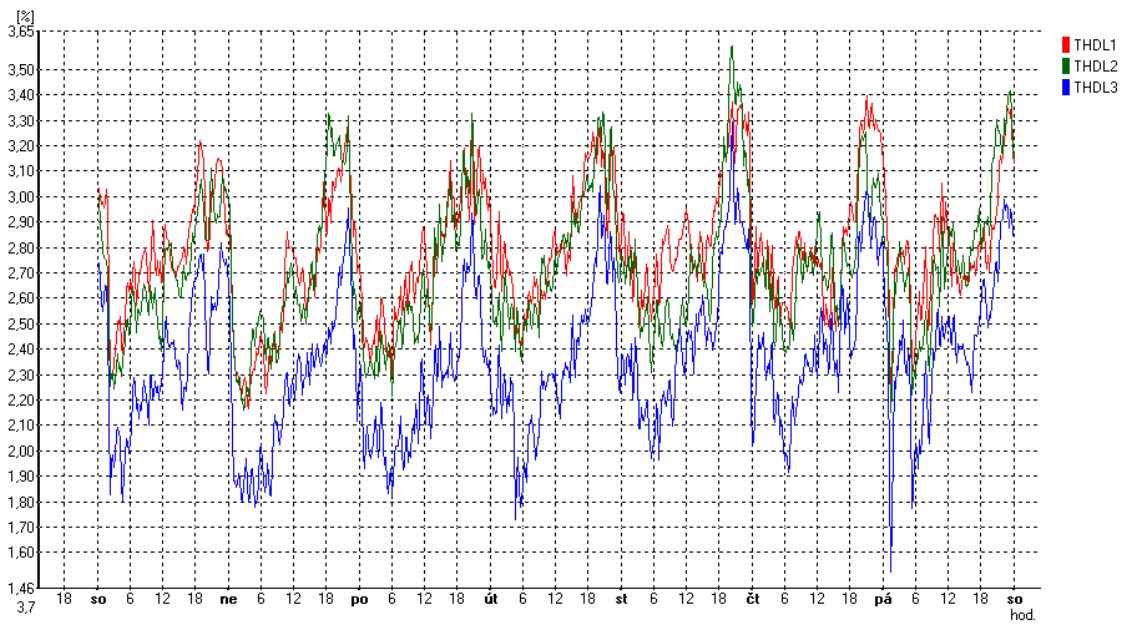
Tab. 9 Naměřené hodnoty pro měřicí bod č.3 - SP5-61/433

| DOBA | Od | Do |
|-----------------------|---------------|--------------------|
| Doba zpracování | 13.5.2017 | 20.5.2017 |
| VELIČINA | EN 50160 | HODN./(Mimo mez) |
| Délka měření | 1 týden | 7d 00:00:00,000 |
| Interval záznamu | 10 minut | 10 min |
| Frekvence 99.5 % roku | 50 Hz +1% -1% | 49,96 - 50,06 / 0% |
| Frekvence 100 % roku | 50 Hz +4% -6% | 49,96 - 50,07 / 0% |
| Nesymetrie 95 % | 2,00% | 0,09 - 0,64 / 0% |

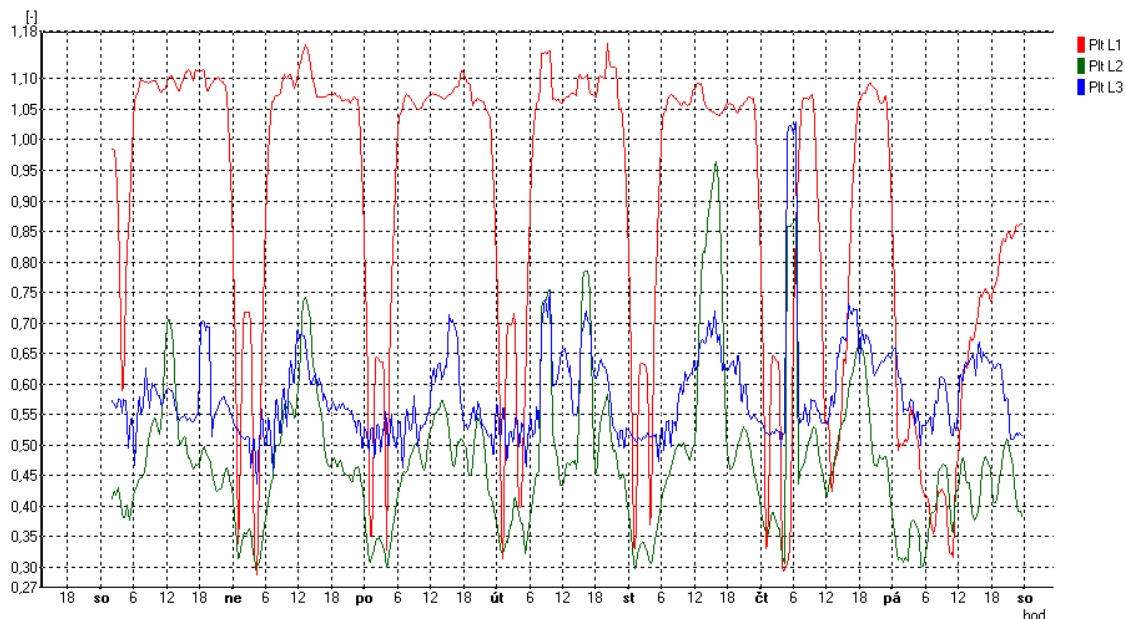
| VELIČINA | EN 50160 | L1 | L2 | L3 |
|--------------------|----------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Napětí 95 % | 230V +10% -10% | 229,4 - 244,6 / 0% | 228,0 - 244,9 / 0% | 226,2 - 244,2 / 0% |
| Napětí 100 % | 230V +10% -15% | 229,4 - 246,6 / 0% | 227,9 - 246,5 / 0% | 226,2 - 246,1 / 0% |
| Flikr Plt 95 % | 1 | 0,29 - 1,11 / 56,6% | 0,29 - 0,74 / 0% | 0,44 - 0,70 / 1,2% |
| THD 95 % | 8,00% | 2,13 - 3,26 / 0% | 2,15 - 3,26 / 0% | 1,50 - 2,90 / 0% |
| 2.harmonická 95 % | 2,00% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,10 - 0,15 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 3.harmonická 95 % | 5,00% | 1,10 - 2,05 / 0% | 1,20 - 2,35 / 0% | 0,95 - 1,85 / 0% |
| 4.harmonická 95 % | 1,00% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,15 / 0% |
| 5.harmonická 95 % | 6,00% | 0,70 - 2,30 / 0% | 0,55 - 2,05 / 0% | 0,20 - 1,95 / 0% |
| 6.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 7.harmonická 95 % | 5,00% | 0,40 - 1,40 / 0% | 0,15 - 1,35 / 0% | 0,15 - 1,30 / 0% |
| 8.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 9.harmonická 95 % | 1,50% | 0,10 - 0,80 / 0% | 0,15 - 0,90 / 0% | 0,15 - 0,85 / 0% |
| 10.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,10 / 0% |
| 11.harmonická 95 % | 3,50% | 0,10 - 0,65 / 0% | 0,00 - 0,20 / 0% | 0,05 - 0,55 / 0% |
| 12.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 13.harmonická 95 % | 3,00% | 0,20 - 0,60 / 0% | 0,10 - 0,65 / 0% | 0,05 - 0,50 / 0% |
| 14.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 15.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,30 / 0% | 0,05 - 0,30 / 0% | 0,00 - 0,30 / 0% |
| 16.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 17.harmonická 95 % | 2,00% | 0,00 - 0,15 / 0% | 0,00 - 0,30 / 0% | 0,05 - 0,25 / 0% |
| 18.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 19.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,20 / 0% | 0,00 - 0,25 / 0% |
| 20.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% |
| 21.harmonická 95 % | 0,50% | 0,00 - 0,15 / 0% | 0,00 - 0,15 / 0% | 0,00 - 0,15 / 0% |
| 22.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| 23.harmonická 95 % | 1,50% | 0,05 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% |
| 24.harmonická 95 % | 0,50% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,05 - 0,05 / 0% | 0,00 - 0,05 / 0% |
| 25.harmonická 95 % | 1,50% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,10 / 0% | 0,00 - 0,15 / 0% |
| HDO_217 99% dne | 9,00% | 0,1 - 0,7 | 0,1 - 0,7 | 0,1 - 0,6 |



Graf 9 Napětí pro 100 % času v bodě 3



Graf 10 THDu pro 95 % času v bodě 3



Graf 11 Dlouhodobý faktor blikání Plt po 95 % času v bodě 3

3.5 Zhodnocení měření

V prvním bodě dosahovaly naměřené hodnoty dle PPDS nejlepších hodnot, což se vzhledem k umístění měřícího zařízení přímo u napájecího bodu očekávalo. Samotné měření a porovnání naměřených hodnot z ostatních bodů tuto skutečnost potvrzuje. V bodě číslo 2 a 3 lze z grafu pro napětí a flickr pozorovat zhoršení kvalitativních parametrů, což je způsobeno impedancí kabelového vedení. I přes to však došlo k překročení povolených mezí pouze v jednom případě - v bodě č. 3 byla pro fázi L1 překročena povolená míra dlouhodobého faktoru blikání o 56,6 % pro 100 % času. Z tohoto důvodu se doporučuje nápravné opatření eliminující míru flickru, jehož možné způsoby jsou popsány v kap. 2.2.3.

4 Ekonomické zhodnocení opatření pro splnění standardů kvality elektrické energie

Náklady na odstranění pronikání vyšších harmonických v určitém úseku sítě nebyly řešeny, protože měřením bylo ověřeno, že v síti nedochází k překročení povolených limitů vyšších harmonických.

Vyhodnocení měření ukázalo, že dle ČSN EN 50160 přesahoval povolené meze pouze flickr. Nebylo tak splněno kritérium kvality elektrické energie. V této části práce budou na základě výsledku měření kvality elektrické energie navrženy dvě nápravná opatření. První variantou A bude výměna stávajícího kabelového vedení za vedení vyššího průřezu. Varianta B pak popíše výměnu stávajícího transformátoru za transformátor s vyšším výkonem.

4.1 Technicko-ekonomické zhodnocení projektu

Aby bylo možné z technicko-ekonomického hlediska porovnat jednotlivé varianty, je nutné použít příslušnou porovnávací metodu investic. V této práci bude pro porovnání investic A a B použita čistá současná hodnota (NPV) sledující vývoj nákladů v průběhu životnosti projektu až do konce jeho životnosti. Do nákladů se zahrnují jak veškeré vstupní investice, tak všechny další náklady vynaložené k provozu a údržbě, tzn. pro případ elektrotechnických zařízení budou provozní výdaje zahrnovat zejména ztráty, pravidelné revize a opravy. Pro jednotlivé roky životnosti projektu se určí peněžní toky, nebo-li cash flow (CF), které je nutné upravit dle vhodné diskontní sazby. Diskont představuje cenu nevyužití příležitosti. V případě zájemně se vylučujících investic je nejvýhodnější projekt s nejvyšší čistou současnou hodnotou.

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (4.1.1)$$

Hodnota diskontu zahrnuje časovou hodnotu peněz a míru rizika investice. Po konzultaci s Ing. Miroslavem Vítkem, CSc. byla tato hodnota stanovena na 6 %. Doba životnosti projektu je stanovena na 30 let a je odvozena od ekonomické životnosti jednotlivých zařízení. Z důvodu stejné doby životnosti obou projektů je pro porovnání zvoleno právě NPV.

Ekonomické výsledky variant budou uvažovány jako rozdíl oproti dosavadnímu stavu, tzn. že v porovnání bude počítáno s investičními výdaji a s rozdíly v provozních nákladech. Provozní stálé náklady se nezmění (např. výdaje na revize, údržbu apod.), změní se pouze náklady na ztráty, u kterých se předpokládá pokles. Tento rozdíl v nákladech bude brán jako příjem a bude vypočten jako úspora ztrát oceněná cenou elektrické energie pro konečného odběratele. Vycházím z principu opportunity cost (ztracenou energii neprodám, protože jsem ztratil příležitost jejího prodeje). Výše ceny za dodávku elektřiny konečnému spotřebiteli je

brána dle aktuálního ceníku PREdistribuce, a.s., konkrétně dle tarifu D02d. Měsíční stálá složka činí 3,87 Kč/A a zahrnuje poplatek za rezervovaný výkon. Po přepočtení na kW za rok je výše tohoto poplatku 32,2 Kč.mProměnnou složkou je cena za spotřebovanou kWh, která je 2,83 Kč.

U obou variant bylo uvažováno, že k dokončení rekonstrukce dojde do jednoho roku jejího od zahájení. V roce nula tak bylo počítáno se vstupními investičními náklady a pro další roky jsou započítány výnosy z ušetřené energie.

Ceny uvedené v této práci jsou bez DPH, protože se jako investor předpokládá společnost PREdistribuce, a.s., která je plátcem DPH. U ceny elektrické energie je DPH neutrální vzhledem k hospodářským výsledkům podnikatele. Proto je počítáno pouze s obchodní a distribuční složkou a poplatkem za rezervovaný výkon.

4.2 Vztahy pro výpočty

Doba využití maxima:

$$T_m = \frac{W_T}{P_m} \quad (4.2.1)$$

Mezi dobou využití maxima a dobou plných ztrát existuje empiricky odvozená závislost aproximovaná parabolickou funkcí. Tento vztah je taktéž uveden v ČSN 34 1610. Pro dobu plných ztrát tedy platí:

$$T_z = \left[0,2 \cdot \frac{T_m}{T_{pr}} + 0,8 \cdot \left(\frac{T_m}{T_{pr}} \right)^2 \right] \cdot T_{pr} \quad (4.2.2)$$

Ze známých štítkových hodnot transformátoru, celkové dodané energie za rok a maximálního zatížení během roku lze po vypočtení doby využití maxima a doby plných ztrát vypočítat roční ztráty elektrické energie v transformátoru:

$$W_z = P_0 \cdot T_{pr} + P_{kn} \cdot \frac{S_m^2}{S_n^2} T_z \quad (4.2.3)$$

Pro činné ztráty v symetricky zatíženém okružním kabelovém vedení platí vztah:

$$P_{z_{kab}} = R \cdot I^2 = 3 \cdot \frac{1}{3} \cdot l \cdot \frac{\rho_{al20}}{s} \cdot I^2 = l \cdot \frac{\rho_{al20}}{s} \cdot I^2 \quad (4.2.4)$$

Rozdíl ročních provozních nákladů před a po rekonstrukci pro kabelové vedení (varianta A) se vypočte ze vztahu:

$$\begin{aligned} \Delta N_{prA} &= \Delta P_{z_{kab}} \cdot (C_p + T_z \cdot C_w) = \\ &= (P_{z_{kab1}} - P_{z_{kab2}}) \cdot (C_p + T_z \cdot C_w) \end{aligned} \quad (4.2.5)$$

Rozdíl ročních provozních nákladů před a po rekonstrukci pro transformátor (varianta B) se vypočte ze vztahu:

$$\begin{aligned} \Delta N_{prB} &= [(P_{01} - P_{02}) + (P_{kn1} - P_{kn2})] \cdot C_p \\ &+ \left[(P_{01} - P_{02}) \cdot T_{pr} \right. \\ &\left. + \left(P_{kn1} \cdot \frac{S_m^2}{S_{n1}^2} - P_{kn2} \cdot \frac{S_m^2}{S_{n2}^2} \right) \cdot T_z \right] \cdot C_w \end{aligned} \quad (4.2.6)$$

pozn. Ve výpočtech se u veličin vyskytují indexy A, B, 1 a 2, přičemž písmena A a B určují variantu a čísla 1 a 2 rozlišují stav před a po provedení rekonstrukce. [22]

4.3 Varianta A

Varianta A počítá s obnovou celé kabelové smyčky NN provedené kabelem AYKY 3x120+70 v délce 2000 m uloženým v zemi. Nový rozvod bude v rámci zlepšení kvalitativních parametrů elektrické energie proveden kabelem AYKY 3x240+120. Z důvodu většího průřezu nového kabelového vedení je nutná výměna všech rozpínacích instalačních skříní a přípojkových skříní na dané smyčce (9x rozpínací a 34x přípojková). Do vstupních investičních nákladů jsou zahrnuty náklady na kabelové vedení, rozpínací a přípojkové skříně, výkopové práce, obnovu povrchů a veškerou projektovou dokumentaci. Tyto položky nejsou v kalkulaci jednotlivě rozepsány, protože se jedná o interní data společnosti PREdistribuce, a.s.

V Tab. 10 jsou uvedeny parametry kabelového vedení vč. vypočítaných ztrát v kabelu před a po rekonstrukci. V Tab. 11 jsou pak uvedeny potřebné údaje k výpočtu úspory (rozdíl) na ztrátách v kabelovém vedení a vypočtená hodnota této úspory. Kalkulace nákladů, CF a DCF po dobu životnosti investice a vypočtená hodnota NPV pro variantu A jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 10 Parametry kabelového vedení

| Parametry kabelového vedení | |
|--|--------|
| l [m] | 2 000 |
| ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}^{-1}$] | 0,0283 |
| s_1 [mm^2] | 120 |
| s_2 [mm^2] | 240 |
| I_{avr} [A] | 37,81 |
| P_{zkab1} [kW] | 674,29 |
| P_{zkab2} [kW] | 337,15 |

Tab. 11 Výpočet úspory ročních provozních nákladů pro A

| Výpočet úspory ročních provozních nákladů pro A | |
|---|------------|
| W_{TA} [kWh] | 230 288,76 |
| P_{mA} [kW] | 54,13 |
| T_{pr} [h] | 8 760,00 |
| T_{mA} [h] | 4 254,36 |
| T_{zA} [h] | 2 504 |
| ΔN_{prA} [Kč] | 2 428 |

Tab. 12 Kalkulace nákladů, výnosů a výpočet NPV pro variantu A

| Roky | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------|--------------|-----------------|---------|---------|---------|
| Investiční náklady [Kč] | -9 915 555,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 0,0 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| Celkové náklady [Kč] | -9 915 555,0 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| CF [Kč] | -9 915 555,0 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| DCF [Kč] | -9 915 555,0 | 2 290,2 | 2 160,6 | 2 038,3 | 1 922,9 |
| Roky | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| Celkové náklady [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| CF [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| DCF [Kč] | 1 814,1 | 1 711,4 | 1 614,5 | 1 523,1 | 1 436,9 |
| Roky | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| Celkové náklady [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| CF [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| DCF [Kč] | 1 355,6 | 1 278,9 | 1 206,5 | 1 138,2 | 1 073,8 |
| Roky | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| Celkové náklady [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| CF [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| DCF [Kč] | 1 013,0 | 955,6 | 901,5 | 850,5 | 802,4 |
| Roky | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| Celkové náklady [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| CF [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| DCF [Kč] | 757,0 | 714,1 | 673,7 | 635,6 | 599,6 |
| Roky | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| Celkové náklady [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| CF [Kč] | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 | 2 427,7 |
| DCF [Kč] | 565,6 | 533,6 | 503,4 | 474,9 | 448,0 |
| Roky | 30 | | | | |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | | | | |
| Úspora ztrát [Kč] | 2 427,7 | NPV [Kč] | | | |
| Celkové náklady [Kč] | 2 427,7 | | | | |
| CF [Kč] | 2 427,7 | | | | |
| DCF [Kč] | 422,7 | | | | |

4.4 Varianta B

Varianta B počítá s výměnou stávajícího transformátoru 630 kVA za transformátor 1000 kVA. Vzhledem k dostatečné kapacitě stávající trafostanice není nutné provádět žádné stavební úpravy a je tak možné umístění nového transformátoru přímo na místo transformátoru původního. Do vstupních nákladů jsou zahrnuty náklady na koupi nového transformátoru a montážní práce. Výnos za prodej či jiné využití starého transformátoru nebude bráno v úvahu, jelikož stávající zařízení je v provozu od 1.1.1980 a k datu 1.1.2010 bylo plně účetně odepsáno. Všechny hodnoty pro výpočty jsou převzaty od společnosti PREdistribuce, a.s.

V Tab. 13 jsou uvedeny parametry stávajícího a nového transformátoru. V Tab. 14 jsou pak uvedeny potřebné údaje k výpočtu úspory na ztrátách v transformátoru a vypočtená hodnota této úspory. V Tab. 15 jsou rozepsány položky pro investiční výdaje a celková kalkulace nákladů, výnosů, CF a DCF po dobu životnosti investice a vypočtená hodnota NPV pro variantu A jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 13 Parametry transformátorů 22/0,4 kV

| Transformátor 22/0,4 kV | r.v. 1980 | r.v.2018 |
|-------------------------|-----------|----------|
| S_n [kVA] | 630,0 | 1 000,0 |
| u_k [%] | 5,99 | 6,00 |
| i_0 [%] | 0,91 | 0,90 |
| P_0 [kW] | 1,84 | 1,10 |
| P_{kn} [kW] | 6,79 | 11,60 |
| $\cos \phi_i$ [-] | 0,998 | 0,998 |

Tab. 14 Výpočet úspory ročních provozních nákladů pro B

| Výpočet úspory ročních provozních nákladů pro B | |
|---|------------|
| W_{TB} [kWh] | 923 290,00 |
| P_{mB} [kW] | 328,10 |
| T_{pr} [h] | 8 760,00 |
| T_{mB} [h] | 2 814,05 |
| T_{zB} [h] | 1 286 |
| ΔN_{prB} [Kč] | 20 415,3 |

Tab. 15 Investiční náklady pro B

| Investiční náklady [Kč] | cena celkem |
|-------------------------|-------------|
| Transformátor 22/0,4 kV | -304 000,0 |
| Instalační práce | -25 000,0 |
| Celkem | -329 000,0 |

Tab. 16 Kalkulace nákladů, výnosů a výpočet NPV pro variantu B

| Roky | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------|------------|-------------------|----------|----------|----------|
| Investiční náklady [Kč] | -329 000,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 0,0 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| Celkové náklady [Kč] | -329 000,0 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| CF [Kč] | -329 000,0 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| DCF [Kč] | -329 000,0 | 19 259,8 | 18 169,6 | 17 141,1 | 16 170,9 |
| Roky | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| Celkové náklady [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| CF [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| DCF [Kč] | 15 255,5 | 14 392,0 | 13 577,4 | 12 808,8 | 12 083,8 |
| Roky | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| Celkové náklady [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| CF [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| DCF [Kč] | 11 399,8 | 10 754,6 | 10 145,8 | 9 571,5 | 9 029,7 |
| Roky | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| Celkové náklady [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| CF [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| DCF [Kč] | 8 518,6 | 8 036,4 | 7 581,5 | 7 152,4 | 6 747,5 |
| Roky | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| Celkové náklady [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| CF [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| DCF [Kč] | 6 365,6 | 6 005,3 | 5 665,4 | 5 344,7 | 5 042,2 |
| Roky | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Úspora ztrát [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| Celkové náklady [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| CF [Kč] | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 | 20 415,3 |
| DCF [Kč] | 4 756,7 | 4 487,5 | 4 233,5 | 3 993,9 | 3 767,8 |
| Roky | 30 | | | | |
| Investiční náklady [Kč] | 0,0 | | | | |
| Úspora ztrát [Kč] | 20 415,3 | NPV [Kč] | | | |
| Celkové náklady [Kč] | 20 415,3 | | | | |
| CF [Kč] | 20 415,3 | -47 986,17 | | | |
| DCF [Kč] | 3 554,5 | | | | |

Zhodnocení

V první kapitole jsem nejprve uvedl základní informace o provozování distribučních soustav. Elektrizaci soustavu jsem z hlediska provozovaných napěťových hladin rozdělil na soustavu přenosovou a distribuční. Dále jsem popsal topologii sítě definující její další vlastnosti a možnosti provozu. Zmínil jsem se také o způsobech provozu uzlů transformátoru a zemních poruchách. Všechny tyto informace pak byly využity při popisu konkrétní sítě NN v praktické části. Navázal jsem výčtem parametrů popisujících kvalitu elektrické energie, které jsou klíčové pro hodnocení kvality elektrické energie jak z pohledu distributora tak odběratele. Povolené meze jednotlivých parametrů definujících kvalitu jsou uvedeny v PPDS a v ČSN EN 50160. Distributor se dle PPDS zavazuje k dodávce elektrické energie předepsané kvality a odběratel má tedy nárok energii v této kvalitě odebírat. Pokud distributor nesplní tyto standardy kvality, má odběratel nárok požadovat od distributora patřičnou kompenzaci.

V kapitole druhé jsem se pak podrobněji zabýval samotným rušením a jeho eliminací. Zaměřil jsem se na vyšší harmonické frekvence, které v době výkonových polovodičových měničů a masivním výskytu elektroniky v domácnostech nabývají na významu a kvalitu sítě ovlivňují v čím dál tím větší míře. Nejprve jsem celý problém harmonických popsal pomocí matematických vztahů pro Fourierův rozklad, který jsem doplnil o ilustrativní příklad. Pro pochopení některých souvislostí následků způsobených harmonickými jsem doplnil i popis složkových soustav. V předchozím odstavci jsem se zmínil o parametrech hodnocení kvality elektrické energie, přičemž jedním z parametrů je také míra harmonických a mezipharmonických složek v síti.

Harmonické by se v síti nevyskytovaly bez jejich původců, kterými jsou zejména nelineární spotřebiče, na jejichž popis a charakteristiky jsem se zaměřil. Uvedl jsem několik typických příkladů nelineárních zátěží a doplnil o převzatý příklad úsporného LED svítidla s graficky znázorněným harmonickým spektrem napětí a proudu. Obsah vyšších harmonických v síti je samozřejmě nežádoucí vzhledem k jejich negativním dopadům na síť. Popsal jsem proto několik problémů, které harmonické a mezipharmonické způsobují a je nutné je řešit. Eliminaci harmonického rušení v sítích NN lze provést buď bez přídavného zařízení úpravou samotného zařízení emitujícího harmonické, nebo s přídavným zařízením v podobě pasivních či aktivních filtračních zařízení. U všech jmenovaných způsobů jsem uvedl členění jednotlivých zařízení, popř. základní vztahy a schémata. V závěru druhé kapitoly popisují prostředky pro omezení kolísání napětí s návazností na flickr.

Klíčovou částí této práce je část praktická, kde spojuji teoretické poznatky a reálné problémy z praxe. Praktická část byla složena z měření v distribuční síti PREDistribuce a.s., kterého jsem se zúčastnil, a z analýzy měření. Měření bylo realizováno v městské čtvrti Hodkovičky, kde v předem vytipovaných bodech sítě NN jsme nainstalovali přístroje pro

měření kvality elektrické energie. Dále jsem provedl vyhodnocení naměřených údajů, kdy jsem analyzoval, že k překročení povolených limitů harmonických v průběhu týdenní doby měření nedošlo. Dle normy ČSN EN 50160 došlo pouze překročení povolených limitů flikru. V době zadání byl předpoklad překročení limitů vyšších harmonických, avšak výsledky měření pozměnily původní cíl ekonomické části práce, která byla zaměřena na určení nákladů k odstranění pronikání vyšších harmonických. Na základě vyhodnocení měření jsem se v poslední části práce zabýval možnými variantami pro eliminaci vlivu flikru. V kapitole 2.2.3 jsem popsal různé možnosti omezování vlivu flikru. Pro realizaci však připadají v úvahu pouze dvě varianty, a to zvýšení zkratového výkonu v napájecím bodě a zvýšení průřezu vedení kabelové smyčky. Připojení nového zdroje do úseku sítě, či přepojení do vyšší napěťové hladiny by bylo vzhledem k poloze sítě velmi obtížné a ekonomicky nevýhodné. Další reálnou variantou pro zlepšení míry vjemu flikru by mohla být instalace sériového kompenzačního zařízení, která vyžaduje komplexnější znalost problematiky a je nad rámec této práce.

Jako variantu A jsem tedy navrhl výměnu stávajícího kabelového vedení provedeného kabelem AYKY 3x120+70 za vedení vyššího průřezu, konkrétně za kabel AYKY 3x240+120. Ve variantě B pak navrhuji výměnu stávajícího transformátoru 630 kVA za transformátor 1000 kVA. Na základě výpočtů pro jednotlivé varianty, které jsem provedl, je patrné, že velikost vstupní investice pro variantu A je zhruba 30krát větší než u varianty B. Pro obě varianty jsem spočítal úsporu provozních nákladů nového zařízení oproti stávajícímu stavu. Předpokládal jsem, že ke změně stálých provozních nákladů nedojde, ale že vzhledem k modernizaci zařízení dojde ke snížení ztrát. Rozdíly ztrát pro původní a nové zařízení jsem ocenil cenou elektrické energie pro konečného odběratele dle ceníku PREdistribuce, a.s. a zařadil je do kalkulace jako příjmy. Pro variantu A není úspora na ztrátách v kabelovém vedení zvláště významná. Činí 2 428,- Kč ročně, což je oproti vstupní investici zanedbatelná částka. U varianty B už tato úspora zanedbatelná není a činí 20 415,3 Kč ročně. Tato částka představuje cca 6 % vstupní investice a výrazně se tak podílí na zvýšení NPV. Nutno však podotknout, že primárním cílem obou opatření není snížení ztrát, ale eliminace flikru, což se těžko oceňuje. Po stanovení celkových hotovostních toků pro jednotlivé roky a jejich úpravě dle diskontní sazby jsem vypočítal NPV, která pro variantu A představuje -9 907 142,92 Kč a pro variantu B pouhých -47 986,17 Kč. NPV pro variantu B je tedy cca 206krát nižší ve srovnání s A. Rozdíl mezi variantami A a B je 9 859 156,75 Kč, kdy varianta B je bezesporu ekonomicky výhodnější. Varianta B je nepochybně výhodnější i v tom ohledu, že s navýšením jmenovitého výkonu transformátoru by došlo ke zvýšení rezerv pro případný budoucí nárůst spotřeby v dané lokalitě. U varianty A by navíc byla náročná technická proveditelnost rekonstrukce, kdy by bylo nutné provést výkopové práce v hustě osídlené lokalitě znamenající značné komplikace, což v případě varianty A zcela odpadá. Celkově jsou tedy technické i ekonomické parametry ve prospěch varianty B a doporučuji jí tak k realizaci.

Použitá literatura

- [1] **TOMAN, Petr, DRÁPELA, Jiří a MIŠÁK, Stanislav.** *Provoz distribučních soustav.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] **ŠTROBLOVÁ, Milada.** *Elektrické sítě městské a průmyslové.* Plzeň : Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-154-X.
- [3] **TESAŘOVÁ, Miloslava.** Vliv způsobu provozu uzlu transformátoru na zemní poruchy. *Katedra elektroenergetiky a ekologie.* [Online] 2000.
<http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap6.pdf>.
- [4] **Český normalizační institut.** *ČSN EN 50160 (33 0122): Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě.* Praha : Český normalizační institut, 2000.
- [5] **PETRUŽELA, Ivan.** Provoz elektrizačních soustav 1. *Kvalita dodávky elektrické energie.* [Online] [Citace: 4. 12 2016.] <https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/MR-kvalitaE-flikr.pdf>.
- [6] **ČEZ Distribuce, a.s.** *ČEZ Distribuce.* [Online] Listopad 2011.
http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf.
- [7] **ŠMÍD, Jaroslav.** VŠB-TUO Ostrava. [Online] 2001.
homen.vsb.cz/~san50/Ceska/GACR/Poklesy_a_preruseni_napeti1.doc.
- [8] **ŠLECHTA, Miroslav.** *Stellar Physics Department of Astronomical Institute of Academy of Sciences of the Czech Republic.* [Online] 2002.
<https://stelweb.asu.cas.cz/~slechta/fourier/fourier.html>.
- [9] **TLUSTÝ, Josef, ŠVEC, Jan a BANNERT, Petr.** *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [10] Fourier Series Approximation to a Square Wave Function. *2PiR All about mathematics.* [Online] <https://sualtinbasak.wordpress.com/mynotes/fourier-series-approximation-to-a-square-wave-function/>.
- [11] **KŮS, Václav.** *Nízkofrekvenční rušení.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-976-1.
- [12] *Výkony a účinnost v deformované síti podle současných názvoslovných norem.* **ŽÁČEK, Jaroslav.** Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2008. Konference ELEN 2008.

- [13] **ŠMÍD, Jaroslav.** Termíny a definice podle ČSN EN 61000-4-30. [Online]
http://homen.vsb.cz/~san50/Ceska/Normy/pojmy_kvality_energie.htm.
- [14] **Český normalizační institut.** *ČSN EN 61000-4-30 (33 3432) - Elektromagnetická kompatibilita: Zkušební a měřicí technika - Metody měření kvality energie.* Praha : Český normalizační institut, 2004.
- [15] **VŠB - TU Ostrava - Katedra elektrotechniky.** Katedra elektrotechniky. [Online]
http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/3_Harmonicke.pdf.
- [16] **CHAPMAN, David.** Copperalliance.eu. [Online] 2015.
<http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>.
- [17] **Embuilt Technologies & UMA Electronics Enterprises.** R&D Design Quality Testing Production. [Online] 16. 5 2015. <http://leddrivertesting.com/live-testing/testing-of-0-5-watt-led-bulb/>.
- [18] **ŽÁČEK, Jaroslav a KÜNZEL, Karel.** EMC v technické praxi III: Omezování rušení v oblasti nízkých kmitočtů. *AUTOMA*. 2006, číslo 06.
- [19] **KŮS, Václav.** *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu.* Praha : BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-062-8.
- [20] *Harmonics - Interharmonics.* **HANZELKA, Zbigniew a BIÉN, Andrzej.** Krakow : AGH University of Science and Technology, 2004.
- [21] *Voltage Disturbances - Flicker Measurment.* **HANZELKA, Zbigniew a BIÉN, Andrzej.** Krakow : AGH University of Science and Technology, 2005.
- [22] **VÍTEK, Miroslav.** *Ekonomika dopravních energetických systémů.* Praha : České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04181-9.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Druhy rozvodů [1]..... | 18 |
| Obr. 2 Způsoby provozu uzlů..... | 19 |
| Obr. 3 Znázornění poklesu a přerušení napětí [7 str. 3]..... | 22 |
| Obr. 4 Úrovně napětí na kmitočtech signálů v % U_s v DS [6 str. 11]..... | 23 |
| Obr. 5 Syntéza "obdélníkového" průběhu [10]..... | 25 |
| Obr. 6 Rozklad nesymetrie do složkových soustav [9 str. 23]..... | 26 |
| Obr. 7 V-A charakteristika lineární zátěže [16]..... | 30 |
| Obr. 8 V-A charakteristika nelineární zátěže [16]..... | 31 |
| Obr. 9 Harmonické spektrum napětí [17]..... | 33 |
| Obr. 10 Harmonické spektrum proudu [17]..... | 33 |
| Obr. 11 Pomocný obrázek k popisu flikru..... | 39 |
| Obr. 12 Vliv změn napětí na světelný tok žárovky [21]..... | 39 |
| Obr. 13 Přípustné hladiny pro pravoúhlé změny napětí pro žárovku [11 str. 151]..... | 40 |
| Obr. 14 Zapojení transformátorů pro omezení harmonických..... | 42 |
| Obr. 15 Paralelní RLC filtr..... | 43 |
| Obr. 16 Paralelní aktivní filtr a jeho zapojení do sítě [9 str. 61]..... | 46 |
| Obr. 17 Sériový aktivní filtr a jeho zapojení do sítě [9 str. 62]..... | 46 |
| Obr. 18 Kombinované filtry [9 str. 63]..... | 47 |
| Obr. 19 Měřicí body a kabelové úseky..... | 49 |
| Obr. 20 Schéma rozvodny TS 5364..... | 50 |
| Obr. 21 Rozvodná skříň NN a připojení měřícího zařízení..... | 51 |
| Obr. 22 Úsek 1 - 1. část..... | 52 |
| Obr. 23 Úsek 1 - 2. část..... | 52 |
| Obr. 24 RIS 61/162 a připojené měřící zařízení..... | 53 |
| Obr. 25 Úsek č. 2..... | 53 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Principiální řešení jednotlivých napěťových hladin [1] | 19 |
| Tab. 2 Základní parametry měřené LED žárovky | 31 |
| Tab. 3 Naměřené hodnoty | 32 |
| Tab. 4 Parametry transformátoru v TS 5364 | 50 |
| Tab. 5 Parametry úseku č. 1 | 52 |
| Tab. 6 Parametry úseku č. 2 | 53 |
| Tab. 7 Naměřené hodnoty pro měřící bod č.1 - TS5364 | 55 |
| Tab. 8 Naměřené hodnoty pro měřící bod č.2 - RIS 161/62..... | 59 |
| Tab. 9 Naměřené hodnoty pro měřící bod č.3 - SP5-61/433 | 63 |
| Tab. 10 Parametry kabelového vedení | 69 |
| Tab. 11 Výpočet úspory ročních provozních nákladů pro A..... | 69 |
| Tab. 12 Kalkulace nákladů, výnosů a výpočet NPV pro variantu A..... | 70 |
| Tab. 13 Parametry transformátorů 22/0,4 kV..... | 71 |
| Tab. 14 Výpočet úspory ročních provozních nákladů pro B..... | 71 |
| Tab. 15 Investiční náklady pro B..... | 71 |
| Tab. 16 Kalkulace nákladů, výnosů a výpočet NPV pro variantu B | 72 |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1 Napětí pro 100 % času v bodě 1 | 56 |
| Graf 2 THD _U pro 95 % času v bodě 1 | 56 |
| Graf 3 Dlouhodobý faktor blikání P _{It} po 95 % času v bodě 1 | 57 |
| Graf 4 Celková dodaná energie v bodě 1 | 57 |
| Graf 5 Napětí pro 100 % času v bodě 2 | 60 |
| Graf 6 THD _U pro 95 % času v bodě 2 | 60 |
| Graf 7 Dlouhodobý faktor blikání P _{It} po 95 % času v bodě 2 | 61 |
| Graf 8 Celková dodaná energie v bodě 2 | 61 |
| Graf 9 Napětí pro 100 % času v bodě 3 | 64 |
| Graf 10 THD _U pro 95 % času v bodě 3 | 64 |
| Graf 11 Dlouhodobý faktor blikání P _{It} po 95 % času v bodě 3 | 65 |