

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Problematika sítí NN s ohledem na nelineární spotřebiče

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel PRUSÍK**
Osobní číslo: **E10B0390P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Problematika sítí NN s ohledem na nelineární spotřebiče**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Zpracujte rešeršním způsobem analýzu současného stavu elektrických sítí NN s ohledem na nelineární spotřebiče.

1. Popište základní charakteristiky konstrukce, topologie a provozu sítí NN.
2. Rekapitulujte vlivy nelineárních spotřebičů (spínaných napájecích zdrojů, UPS, elektronických předřadníků, apod.) na aktivní provozní parametry v sítích NN.
3. Zhodnoťte současné technické možnosti omezení negativních vlivů nelineárních spotřebičů jak na straně vlastních spotřebičů, tak v síti NN.

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

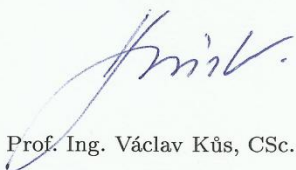
1. Dle pokynů konzultanta.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

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


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku sítí nízkého napětí s ohledem na nelineární spotřebiče. Přestavuje nelineární spotřebiče jako zdroj rušení v síti nízkého napětí a popisuje vzniklé problémy s tímto rušením. Následně popisuje možné varianty omezení vzniku i šíření tohoto rušení.

Klíčová slova

Nelineární spotřebič, harmonické, filtr, frekvence, síť, rušení

Abstract

Presented bachelor's thesis is focused on low voltage networks with nonlinear consumers consideration. Thesis introduces nonlinear consumer as source of jamming in low voltage network and describes caused problems with this jamming. Then it describes possible options to reduce producing and diffusing this jamming

Key words

Nonlinear consumer, harmonics, filter, frequency, network, jamming

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Pavel Prusík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce práce doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	13
1 SÍŤE NN	14
1.1 ROZDĚLENÍ PODLE UMÍSTĚNÍ VODIČŮ	14
1.1.1 Kabelové vedení	14
1.1.2 Venkovní vedení	15
1.2 ROZDĚLENÍ PODLE PROVOZU UZLU SÍŤE	15
1.2.1 Soustava účinně uzemněná	15
1.2.2 Soustava izolovaná	15
1.2.3 Soustava neúčinně uzemněná	16
1.3 TOPOLOGIE SÍŤÍ NN	16
1.3.1 Paprskové síť	16
1.3.2 Okružní síť	17
1.3.3 Mřížové síť	18
2 RUŠENÍ	19
2.1 ROZDĚLENÍ RUŠENÍ	19
2.1.1 Podle vzniku	19
2.1.2 Rozdělení podle frekvenční oblasti:	20
2.2 MOŽNOSTI ŠÍŘENÍ RUŠENÍ	20
2.2.1 Galvanická vazba	20
2.2.2 Kapacitní vazba	21
2.2.3 Induktivní vazba	22
2.3 HARMONICKÉ	22
2.3.1 Výkony v obvodech s výskytem neharmonických průběhů proudu a napětí	23
2.3.2 Popis harmonických	25
2.3.3 Poměrné hodnoty	26
2.3.4 Činitel THD	26
2.3.5 Zdroje harmonických	27
2.3.6 Vznik harmonických	31
2.3.7 Problémy způsobené harmonickými proudy	32
2.3.8 Problémy způsobené harmonickými napětími	34
2.4 MEZIHARMONICKÉ	35
2.4.1 Zdroje mezharmonických	35
2.4.2 Problémy způsobené mezharmonickými	36
3 MOŽNOSTI OMEZENÍ HARMONICKÝCH	38
3.1 FILTRAČNĚ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ	38
3.1.1 Kompenzace účinníku	38
3.1.2 Kompenzační zařízení lze do sítě umístit několika způsoby	39
3.1.3 Samostatné kondenzátory	39
3.1.4 Chráněné kompenzační kondenzátory	40
3.1.5 FKZ	40
3.1.6 Přínos FKZ pro stabilizaci napětí v síti	41
3.2 AKTIVNÍ FILTRY	42
3.2.1 Paralelní aktivní filtr	43
3.2.2 Sériový aktivní filtr	44
3.2.3 Kombinovaný aktivní filtr	45
3.2.4 Způsoby filtrace harmonických	45

3.2.5	<i>Způsoby kompenzace účinníku pomocí aktivních filtrů</i>	45
ZÁVĚR	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49

Seznam symbolů a zkratk

Al	hliník
C	kapacita
Cu	měď
D	deformační výkon
d	relativní změna napětí
ESD	elektrostatický výboj
f	frekvence
f_h	kmitočet h-té harmonické
h	řád harmonické
HC	celkový obsah harmonických
HDO	hromadné dálkové ovládání
$i_1 I_1$	první harmonická proudu – okamžitá, ef. Hodnota
i_h, I_h	h-tá harmonická proudu – okamžitá, ef. Hodnota
I	proud
$I_{\check{c}1}$	činná složka první harmonické před filtrací
$I_{\check{c}1F}$	činná složka první harmonické proudu po filtraci
I_{j1}	jalová složka první harmonické před filtrací
I_{j1F}	jalová složka první harmonické proudu po filtraci
I_{kap}	kapacitní proud
L	indukčnosti
M	vzájemná indukčnost cívek
NN	nízké napětí
p, P	činný výkon – okamžitá hodnota
P_{lt}	dlouhodobá míra vjemu blikání
P_{SP}	činný výkon spotřebiče
P_{st}	krátkodobá míra vjemu blikání
P_{sti}	po sobě jdoucí odečty krátkodobé míry vjemu blikání
P_Z	ztráty v kondenzátoru
P_{Σ}	celkový činný výkon
$\Delta P_{u\check{s}\%}$	ztráty ušetřené vlivem kompenzace
Q_c	potřebný kompenzační výkon kondenzátoru

Q_k	kompenzační výkon kondenzátorové baterie
Q_Σ	celkový jalový výkon
R	činný odpor
R_F	činný odpor filtru
R_S	činný odpor sítě
S	zdánlivý výkon
S_k	zkratový výkon sítě
S_{sp}	zdánlivý výkon spotřebiče
ΔS_A	změna výkonu odběratele
t	čas
T	perioda střídavého napětí a proudu
THD_U	harmonické zkreslení napětí
THF_U	činitel harmonického napětí
u_k, U_k	k- tá harmonická střídavého napětí zdroje – okamžitá, ef. Hodnota
U_1	sdužené napětí 1. harmonické střídavého napájecího zdroje, ef. hodnota
U	napětí
U_h	napětí h-té harmonické
U_N	jmenovité síťové napětí
UPS	zdroj nepřerušitelného napětí
U_r	napětí na odporu
ΔU_1	úbytek napětí 1. harmonické po připojení FKZ
ΔU_{1F}	úbytek napětí první harmonické po připojení FKZ
ΔU	povolená hodnota odchylky celkového napětí
ΔU_H	napětí harmonických vyšších řádů před připojením FKZ
ΔU_{HF}	napětí harmonických vyšších řádů po připojení FKZ
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
X_s	reaktance sítě a transformátoru
Z_s	impedance nadřazené soustavy
β	součinitel soudobosti
γ	poměr mezi výpočtovým zatížením a středním měsíčním zatížením
φ_{UK}	fázový posun k- té harmonické
φ_{i1}	fázový posun 1-té harmonické

φ_h fázový posun h-té harmonické obecně

Λ celkový účinník

ωúhlová frekvence

ρ_K kompenzační účinek filtru

ρ_F filtrační účinek filtru

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku rušení, které je vyvoláno působením nelineárních spotřebičů v síti nízkého napětí.

Text je rozdělen do tří částí: první část představuje síť nízkého napětí z pohledu kabelových a venkovních vedení a rozdělení dle topologie sítě. Druhá část uvádí přehled nelineárních spotřebičů a jejich příčiny a účinky. Dále představuje a definuje harmonické a mezipharmonické. Ve třetí části jsou popsány kompenzační a filtrační zařízení.

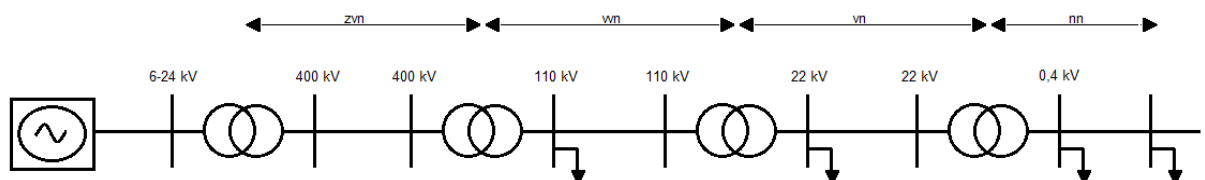
1 Sítě NN

Elektrická energie je v dnešním moderním světě jednou z nejdůležitějších komodit na trhu. Každé zařízení spotřebovávající elektrickou energii má definované elektrické parametry, které je třeba dodržet, aby toto zařízení správně pracovalo. Proto je třeba, aby dodávána elektrická energie splňovala normou dané parametry.

Parametry elektrické energie jsou dány normou ČSN EN 50160, která je převzata z evropské normy EN 50160:1999. Tato norma definuje hlavní kritéria v místech odběru z distribuční sítě vysokého a nízkého napětí za běžných podmínek. Norma nám tedy předkládá napěťové charakteristiky s ohledem na kmitočet, velikost, tvar vlny a symetrie trojfázových napětí. Tyto parametry mohou ovlivnit zapojené nelineární spotřebiče v síti.[9]

Se sítěmi nízkého napětí se setkáváme nejčastěji v běžném životě (domácnosti, školy, veřejné osvětlení). Rozvody po domácnostech jsou provedeny na hladině 230 V, a kde je třeba tak i na hladině 400 V.

Sítě nízkého napětí jsou sítě, které jsou provozovány na hladině do 1000 V



Obr. 1.1 Schéma rozdělení veřejné sítě

1.1 ROZDĚLENÍ PODLE UMÍSTĚNÍ VODIČŮ

1.1.1 Kabelové vedení

Kabelová vedení nalezneme převážně v místech s hustou zástavbou (města), kde by bylo složité dodržet dostatečnou bezpečnou vzdálenost potřebnou pro venkovní vedení. Kabely jsou vedeny kolektory (Praha) či uloženy přímo v zemi v pískovém loži nebo jsou umístěny v ochranných trubkách (chráničky). Dochází i k úspoře místa tím, že není potřeba sloupů pro vedení. V neposlední řadě kabelové vedení má ve městě estetický význam. Kabely jsou používány na hladinách VN a NN (ve velkých městech 110 kV) Kabely jsou různého provedení. Kabely se od sebe liší materiálem jádra (Al nebo Cu), průřezem jádra (kruhový,

sektorový), odlišnou izolací žil, různým materiálem stínění, obalu apod. U kabelového vedení není výskyt poruch tak častý, jako u venkovního vedení, ale poruchy mají převážně trvalý charakter. [1]

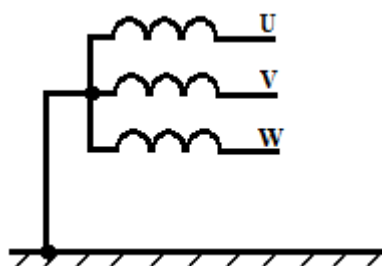
1.1.2 Venkovní vedení

Venkovní vedení se vyskytuje v místech s řídkou zástavbou (vesnice, okrajové části měst) a dále jako přívod elektrické energie k městům, kde vstupuje do transformační stanice a následně přechází na kabelové vedení. Venkovní vedení má značně nižší investiční náklady oproti kabelovému vedení. Naopak jsou zde vyšší provozní náklady (údržba, ztráty). U venkovních vedení se stále častěji setkáváme s holými vodiči AlFe, které dnes úspěšně nahrazují samonosné AES kabely. Výskyt poruch u venkovního vedení je častější než u kabelu, naproti tomu má většina poruch přechodný charakter. Oproti kabelům mají větší úbytek napětí ΔU při stejném průřezu a vzdálenosti [1]

1.2 ROZDĚLENÍ PODLE PROVOZU UZLU SÍTĚ

1.2.1 Soustava účinně uzemněná

Veškeré nulové body sítě jsou přímo (vodičem) spojeny se zemí. Jestliže dojde ke spojení fázového vodiče se zemí, nazývá se tato porucha zemní zkrat. Takto jsou provozovány sítě VVN a NN. [1]

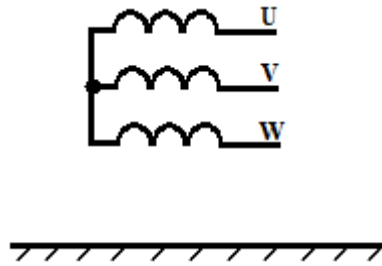


Obr. 1.2 Soustava účinně uzemněná

1.2.2 Soustava izolovaná

Nulové body sítě nejsou spojeny se zemí. Sít' je izolovaná od země. Jestliže dojde ke spojení jedné fáze sítě se zemí, dojde k tzv. zemnímu spojení. Pro izolovanou soustavu toto zemní spojení neznamená okamžité zapůsobení ochrany a přerušení dodávky elektrické energie, nicméně dochází k signalizaci zemního spojení a nepříjemnému efektu zvýšení napětí

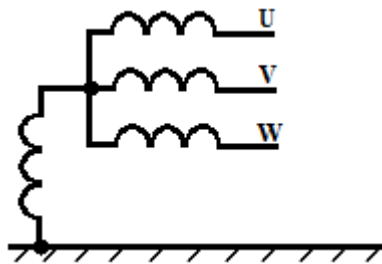
na sdruženou hodnotu zdravých fází. Takto bývají provozovány sítě VN (pouze malého rozsahu $I_{\text{kap}} < 20 \text{ A}$). Tyto sítě se často vyskytují v průmyslových rozvodech. [1]



Obr. 1.3 Soustava izolovaná

1.2.3 Soustava neúčinně uzemněná

Uzel sítě je se zemí spojen přes velkou tlumivku (Petersonovu tlumivku). Petersonova tlumivka generuje proud induktivního charakteru, který slouží k vykompenzování kapacitního proudu, vznikajícího při zemním spojení. Poruchový proud oproti izolované soustavě je nižší a má činný charakter. Nevýhodou je potřeba udržování vyladěného stavu sítě a náklady na zhášecí tlumivku a automatické ladění. [1]



Obr. 1.4 Soustava neúčinně uzemněná

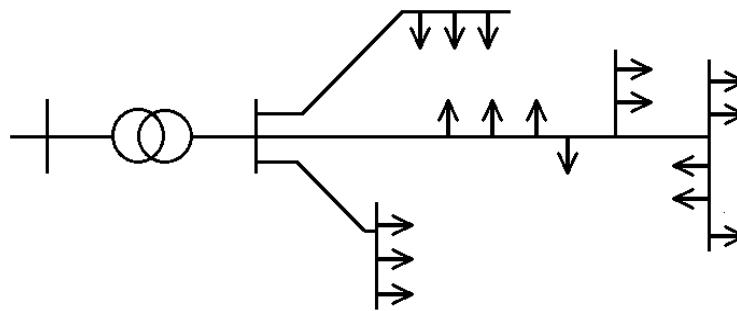
1.3 Topologie sítí NN

- Paprsková síť
- Okružní síť
- Mřížová síť

1.3.1 Paprskové sítě

Paprskové sítě jsou nejjednodušší sítě z pohledu přehlednosti. Ke každému odběru je vedeno vedení pouze z jedné strany, proto z hlediska zabezpečení dodávky elektrické energie jsou paprskové sítě nejméně spolehlivé. Většinou se tyto sítě nachází na vesnicích či nehuště zasídlených místech, kde nejsou kladeny požadavky na vyšší stupeň dodávky zabezpečení energie. Dále je můžeme vidět v průmyslových rozvodech ať již na hladinách VN či NN.

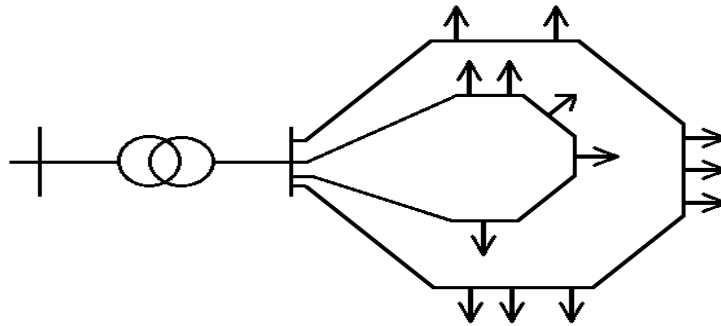
Výhodou paprskových sítí jsou poměrně malé zkratové proudy oproti ostatním typům sítí a vcelku dobrá přehlednost, která následně usnadní vyhledání případné poruchy. Jak již bylo řečeno, velkou nevýhodou u tohoto typu sítí je nízká spolehlivost dodávky. To neumožňuje použít tento typ sítě k napájení spotřebičů, které podléhají vyšším požadavkům na zajištění dodávky elektrické energie a pokud již dojde k poruše, odstavení od elektrické energie může trvat značnou dobu. Další nevýhodou je možný pokles napětí na koncích sítě. Zvýšení spolehlivosti dodávky se provádí např. pomocí dvojího vedení, sekčního spínače či rezervního vedení. Každý takovýto zásah, ale již lehce snižuje výhody paprskové sítě, pro které je užitečná. [1]



Obr. 1.5 Paprsková síť

1.3.2 Okružní síť

U okružní sítě je spotřebič na rozdíl od paprskové sítě napájen ze dvou stran. Tím je zvýšena spolehlivost dodávky elektrické energie. Napájení je možno provést jak z jednoho napájecího místa, tak i ze dvou různých napájecích míst. Často se ale okružní síť provozuje rozpojená, a poté má parametry paprskové sítě. V určeném místě je síť přerušena a ke spojení dochází, pouze v případě poruchy jedné části rozvodu, druhá část pak působí jako záložní. Jestliže se má okružní síť takto provozovat, je třeba náležitě dimenzovat vedení. Jako rozpojená okružní síť se provozuje z důvodů snížení zkratových proudů a zároveň je usnadněno jištění sítě. Při jištění okružní sítě je třeba použití směrových ochranných zařízení. Výhodou provozování sítě okružním způsobem je rozdělení proudů podle velikosti odběru a tím možnost snížit průřez vedení. Dále v okružní síti nedochází k takovému kolísání napětí. A hlavní výhodou je zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie. [1]



Obr. 1.6 Okružní síť

1.3.3 Mřížové sítě

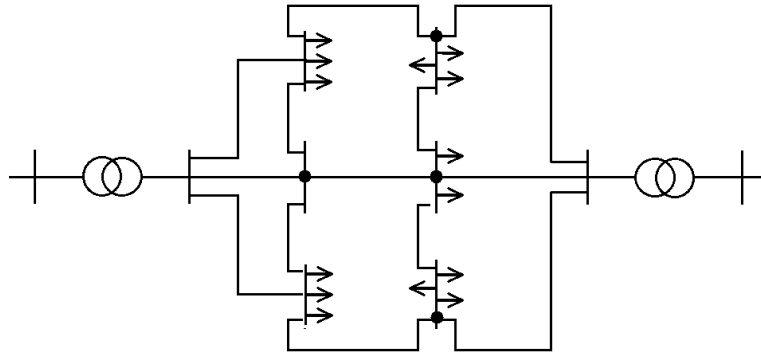
Hlavní výhodou všech typů mřížových sítí je zvýšená spolehlivost dodávky elektrické energie, která je největší ze všech typů sítí. Pravděpodobnost výpadku je oproti paprskovým sítím 9000krát menší. Kolísání a úbytek napětí je u mřížových sítí nejmenší. Oproti tomu značnou nevýhodou jsou velké zkratové proudy a nízká přehlednost sítě. [1]

- **Zjednodušená mřížová síť**

Může vzniknout, jestliže ve společné síti pracují alespoň dva transformátory. Vytvoří se spojení mezi těmito dvěma transformátory o větším průřezu, které je jištěno výkonovými pojistkami. V patřičném místě jsou umístěny slabší pojistky. Poměr jmenovitých proudů výkonových pojistek ku slabým pojistkám je 2:1. Dojde-li v síti ke zkratu, jako první reaguje slabá pojistka a až následně pojistka výkonová. Odpojí se pouze ta část, ve které nastane porucha a ostatní část sítě nadále funguje. Reaguje na poruchy na straně nízkého napětí, ne na straně vysokého napětí. [1]

- **Klasická mřížová síť**

Klasické mřížové sítě se vyskytují ve velkých městech (Brno, Praha), kde několik napájecích stanic napájí několik transformačních stanic. Jednotlivá vedení jsou propojena v místech křížení a jištěna pomalými pojistkami se stejnou jmenovitou hodnotou. Jelikož v místě poruchy teče mnohem větší proud, než v ostatních částech obvodu, dojde k zapůsobení pojistky mnohem rychleji a přeruší se postižená část. Pravděpodobnost výpadku je 4-5krát menší oproti zjednodušené mřížové síti. [1]



Obr. 1.7 Mřížová síť

2 Rušení

2.1 Rozdělení rušení

Rušení lze dělit podle několika parametrů

2.1.1 Podle vzniku

Rozděluje, zdali byl rušivý signál způsoben působením techniky (člověkem) nebo vlivem přírodních podmínek.

- **Přírodní signály rušení**

Toto rušení nevzniká zásahem člověka, ale přírodními úkazy jako elektromagnetické jevy v atmosféře (výboj blesku) či polární záře, rušivé emise Slunce apod. Tato rušení bývají vysokofrekvenčního charakteru. [7]

- **Umělé signály rušení**

Umělé signály rušení vznikají vlivem působení člověka a dají se dále rozdělit na:

- **Rušivé signály vytvářené záměrně:** Signály záměrně vytvářené se v jistých místech a oblastí mohou stát signály rušivými. Takový signály jsou HDO signály, rádiové, televizní a radarové signály, signály mobilních telefonů, a také přenášení elektrické energie o vysokých hodnotách proudu a napětí [7]

- **Rušivé signály vytvářené nezáměrně:** Signály vytvářené nezáměrně jsou signály nepotřebnými a k ničemu nevyužitelnými a pouze způsobují rušení ostatních zařízení, ale i zařízení vyvolávající tyto rušivé signály. Mezi tyto signály patří rušivé signály produkované nelineárními zařízeními. Nelineární zařízení způsobující tyto rušivé signály jsou např. polovodičové měniče, elektrické obloukové pece, elektronické předřadníky zářivek, spínané zdroje atd. [7]

2.1.2 Rozdělení podle frekvenční oblasti:

Dělení dle kmitočtové oblasti je vcelku důležité, neboť dobře ukazuje charakter a diferenci mezi různými ději, a je zároveň úzce spjata jak s výběrem vhodných odrušovacích a omezujících zařízení, tak i se způsobem jakým se rušivé signály šíří. [2]

Prvotní a základní dělení je na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční oblast a je děleno kmitočtem 9kHz. Nízkofrekvenčními rušení je definováno v rozmezí od 0kHz až do 9kHz. Vysokofrekvenční rušení se nachází v oblasti od 9kHz do normou udávaných 150kHz. [2]

2.2 Možnosti šíření rušení



Obr. 2.1 Blokové schéma

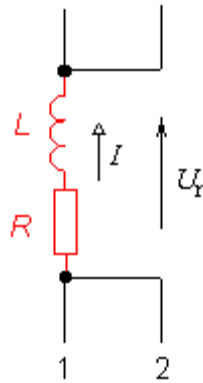
Elektromagnetické rušení se může v sítích nízkého napětí šířit mnoha způsoby. Důležitá z pohledu velikosti, jak moc rušení ovlivní a zasáhne systémy v síti nízkého napětí je vazba mezi zdrojem rušení a rušeným zařízením. Druhy vazeb jsou:

2.2.1 Galvanická vazba

Lze ji nalézt v místech, kde proudy protékají přes sériovou impedanci (obvodu, sítě) jejíž charakter většinou bývá RL. Při nízkých kmitočtech převažuje odporová složka, která nepůsobí takové potíže, ale při vysokých kmitočtech převažuje induktivní složka a i malý proud, který přes cívku bude protékat, vyvolá napětí, které působí rušivě na ostatní zařízení. Nejvyšší hodnoty dosahuje v blízkosti zařízení vykazující rušení. [6]

Příklady galvanické vazby: vnitřní impedancí společného napájecího zdroje, impedance společného přívodu řídicích obvodů, impedance společného zemnicího systému [6]

Omezení galvanické vazby: pro nízké frekvence postačuje uzemnění provést v jednom společném bodě, ale u vyšších frekvencí je třeba provést přerušeni zemní smyčky pomocí oddělovacího transformátoru, neutralizačního transformátoru, feritových kroužků, vedení s útlumovým pláštěm, elektromechanického relé, optočlenu či optického kabelu [6]



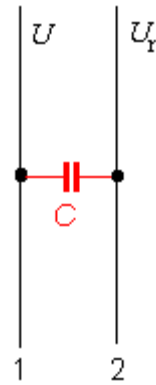
Obr. 2.2 Galvanická vazba [6]

2.2.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba vzniká mezi dvěma zařízeními či částmi obvodu, protože se zde nachází prvek, nazývaný parazitní kapacita. Jelikož mezi dvěma vodivými částmi, kde každé z nich má jiný potenciál, vzniká elektrické pole. [6]

Příklady kapacitní vazby: společné vedení silových kabelů s kabely sdělovacími a datovými. Kapacitní vazba existuje i u desek plošných spojů mezi jednotlivými vodivými cestami na desce. [6]

Omezení kapacitní vazby (snížení parazitní kapacitní vazby): použití stíněných vodičů, skroucení vodičů [6]



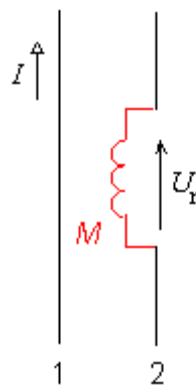
Obr. 2.3 Kapacitní vazba [6]

2.2.3 Induktivní vazba

Proud, který protéká vodičem, vytváří kolem tohoto vodiče magnetické pole (proměnné či konstantní). Jestliže se vodič bude nacházet v magnetickém poli časově proměnném, začne se na něm indukovat napětí. Velikost indukovaného napětí je pak dána kmitočtem, proto je tato vazba nejvíce nebezpečná při velkých proudech o vysokých frekvencích [6]

Příklady indukivní vazby: elektrostatické výboje a to umělé (ESD) tak přírodní (blesk) [6]

Omezení indukivní vazby: minimální délka společně jdoucích vodičů (obvodů), snaha o co největší vzdálenost mezi rušícím a rušeným obvodem, minimalizace proudové smyčky rušeného obvodu, kroucením vodičů rušeného obvodu, stínění rušeného obvodu [6]



Obr. 2.4 Induktivní vazba [6]

2.3 Harmonické

Harmonickými nazýváme proudy ale i napětí, které se svým kmitočtem liší od základního kmitočtu. Základní kmitočet v ČR je 50 Hz (pro USA je 60 Hz). Harmonické jsou celými

násobky základního kmitočtu. V síti se nevyskytují pouze celočíselné násobky základního kmitočtu (harmonické), ale také i neceločíselné násobky základního kmitočtu, které jsou nazývány meziharmonické. [3]

Přehled harmonických			
Harmonická	Meziharmonická	Nižší harmonická	SS složka
$f=n \cdot f_1$ (n je celočíselný násobek vyšší než 1)	$f=n \cdot f_1$ (n je neceločíselný násobek vyšší než 1)	$f > 0 \text{ Hz a } f < f_1$ (n je větší než 0 a menší než 1)	$f=n \cdot f_1$ (n je rovno 0)

2.3.1 Výkony v obvodech s výskytem neharmonických průběhů proudu a napětí

Napětí v dle Fourierovi řady lze vyjádřit:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} u_k(t) \tag{2.1}$$

kde

$$u_t(t) = \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t + \varphi_{uk}) \tag{2.2}$$

Proud dle Fourierovi řady lze vyjádřit:

$$i(t) = \sum_{l=0}^{\infty} i_l(t) \tag{2.3}$$

kde

$$i_l(t) = \sqrt{2} I_l \sin(l\omega t + \varphi_{il}) \tag{2.4}$$

Základní definice výkonu:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \tag{2.5}$$

Činný výkon je definován:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \tag{2.6}$$

Činný výkon neharmonického proudu a napětí:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \sum_{k=0}^{\infty} P_h \quad (2.7)$$

Zdánlivý výkon je stejně jako u harmonických proudů a napětí určen jakou součin efektivních hodnot proudů a napětí

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \quad (2.8)$$

Jalový výkon:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_k = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h \quad (2.9)$$

Jelikož dochází k nerovnosti u harmonických průběhů:

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad (2.10)$$

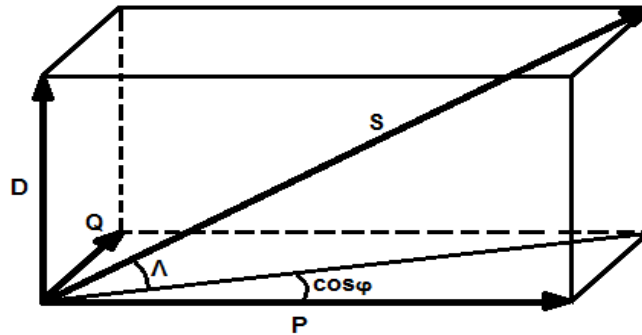
zavádí se pojem deformační výkon, jenž je definovaný:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (2.11)$$

Výkon deformační stejně jako jalový výkon způsobují v síti zvýšení ztrát a zhoršují využitelnost sítě.

Pokud se nacházíme v neharmonických obvodech je zde zaveden tzv. skutečný účinník Λ (jelikož se zde nachází deformační výkon, nevystačíme si s účínkem $\cos \varphi$). Mnohdy je nazýván jako faktor výkonu (Power Factor): [2]

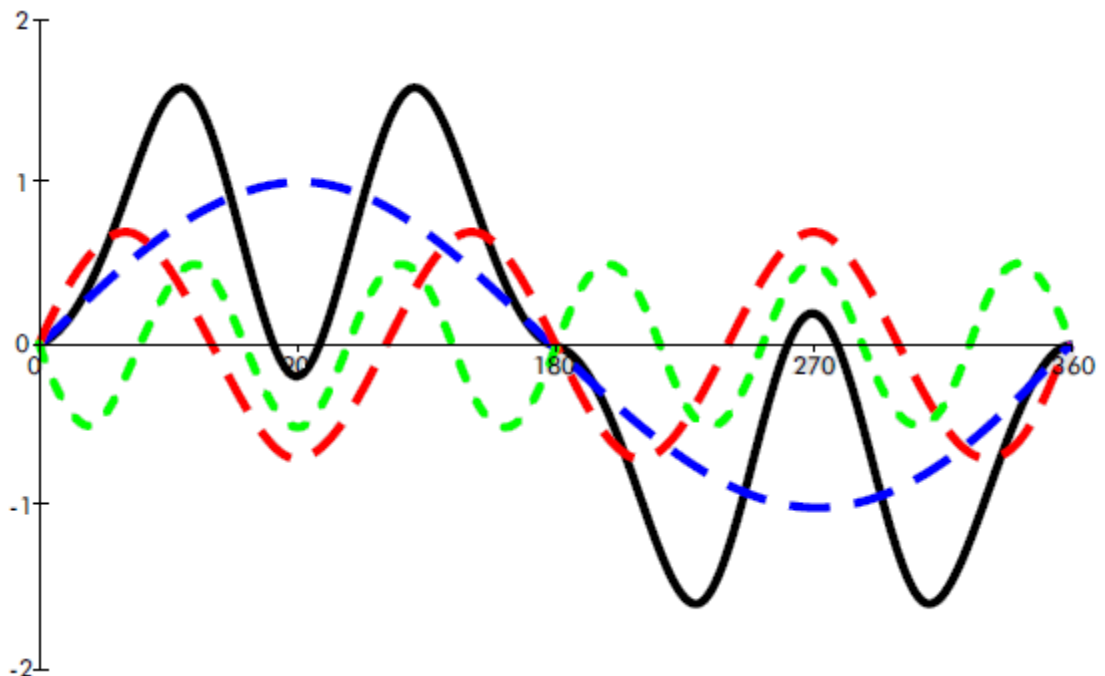
$$\Lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2.12)$$



Obr. 2.5 Diagram složek výkonů v obvodu s neharmonickými napětí a proudy

2.3.2 Popis harmonických

Harmonické nebo také často nazývané vyšší harmonické jsou podle normy ČSN IEC 50 (161) definovány jako složka většího než 1. řádu Fourierovy řady periodické veličiny. Řád harmonické označuje písmeno h (např. čtyřicátá harmonická je $h=40$). Základní harmonickou je označována složka 1. řádu Fourierovy řady periodické veličiny. Pro ČR má základní harmonická proudů či napětí hodnotu 50 Hz. Proudů a napětí o vyšší frekvenci (celočíslné násobky) jsou označovány jako harmonické (vyšší harmonické) např. třetí harmonická o frekvenci 150 Hz či pátá harmonická o frekvenci 250 Hz [3]



Obr. 2.6 Zdeformovaný časový průběh proudu s obsahem 1. 3. a 5. harmonické [3]

Na obrázku 2.6 jsou vidět jednotlivé harmonické (1. 3. a 5. Harmonická) a výsledný průběh součtu okamžitých hodnot těchto harmonických. Pokud změříme takovýto průběh

obyčejným multimetrem, nikoliv multimetrem s označením TRUE RMS, byly by naměřeny nesprávné hodnoty. Problém může také nastat u zařízení, které se řídí podle průchodu proudu nulou. Jestliže by se na takovéto zařízení dostal průběh z obrázku 2.6, zařízení by správně nefungovalo. [3]

2.3.3 Poměrné hodnoty

K posouzení velikosti harmonické je zavedena poměrná hodnota h-té harmonické. Poměrná hodnota je udávána jako poměr efektivní hodnoty h-té harmonické (U_h) a efektivní hodnoty základní harmonické (U_1). Matematické vyjádření: [2]

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} \quad [-] \quad (2.13)$$

$$u_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} * 100 \quad [\%] \quad (2.14)$$

2.3.4 Činitel THD

Bez toho aniž bychom věděli o spektru harmonických proudů nelze vyhodnotit, co způsobují a následně jak tyto harmonické omezit. Z tohoto důvodu se zavádí činitel harmonických (THF) a činitel harmonického zkreslení (THD). Pomocí těchto činitelů lze sledovat obsah harmonických v celém spektru. Činitel harmonických je udáván jako poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických střídavé veličiny k efektivní hodnotě této veličiny, kdežto činitel harmonického zkreslení je udáván jako poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických střídavé veličiny k efektivní hodnotě základní harmonické této veličiny. Matematické vyjádření: [2]

$$THD_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1} \quad (2.15)$$

$$THF_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U} \quad (2.16)$$

Tyto rovnice zabírají celé spektrum se všemi frekvencemi uvnitř tohoto spektra

Pokud bychom se zaměřily výhradně na harmonické, dojde k následovné úpravě rovnic:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad (2.17)$$

$$THF_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U} \quad (2.18)$$

Často se počítá s rozsahem do 40. harmonické někdy až 50. harmonické.

2.3.5 Zdroje harmonických

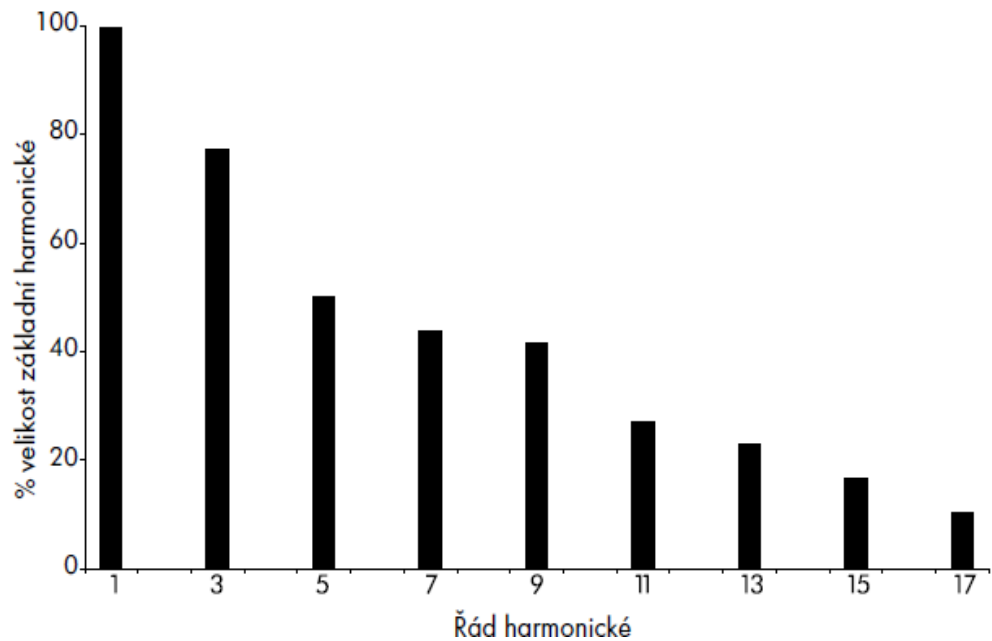
Mezi zdroje generující harmonické patří všechny nelineární spotřebiče.

Jednofázové spotřebiče:

- **Elektronické předřadníky**

V době kdy většina svítidel používala obyčejné žárovky s wolframovým vláknem, nemělo osvětlení vliv na vznik harmonických. V poslední době se, ale velice rozšířilo používání elektronických předřadníků pro svítidla. Důvodem jejich značného rozšíření je zlepšená účinnost svítidel, ale jejich hlavní výhodou je prodloužená životnost při zachování stejných světelných parametrů. Dalším z důvodů je také v neposlední řadě nařízení č.244/2009 vydáno evropskou unií, které zakazuje používání klasických žárovek. [3]

Jejich hlavní a největší nevýhodou je generování harmonických. Svítidlo má umístěný malý elektronický předřadník přímo v patici, ve které je usazena zářivka nebo se nachází vedle a je se svítidlem propojen za pomoci kabelů. Pokud jsou tato svítidla používána zřídka (domácnosti) nepocítíme jejich neblahé účinky na síť. Pokud se, ale budou svítidla vyskytovat v hojně míře (školy, kanceláře) vliv harmonických a tedy rušení může být již znatelný. [3]



Obr. 2.7 Spektrum harmonických odebíraných elektronickými předřadníky [3]

- **Malé zdroje nepřerušitelného napájení**

Zdroje nepřerušitelného napájení neboli UPS (Uninterruptible Power Systems) se čím dál více rozšiřují, jelikož je čím dál více spotřebičů, které vyžadují zvýšenou spolehlivost na dodávku elektrické energie. V poslední době kladou především informační technologie vysoké nároky na dostatečně kvalitní a v dostačujícím množství dodávanou elektrickou energii. Zdroje nepřerušovaného napájení, jak už název napovídá, zaručují permanentní zásobování elektrickou energií ať již při úplném výpadku napájení či pouze při poklesu napětí napájecí sítě. Zdroj nepřerušitelného napětí se skládá z: [8]

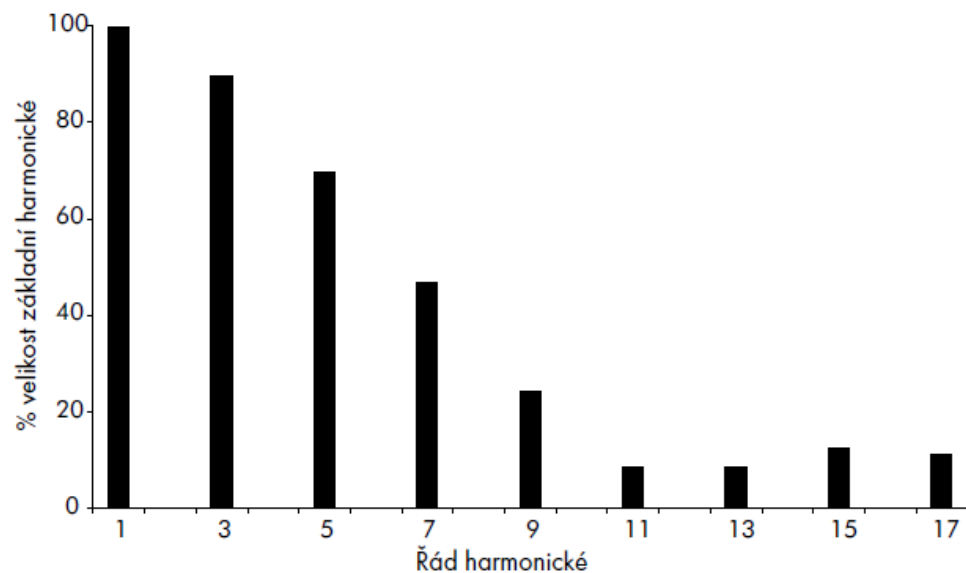
- **Usměrňovač:** Zajišťuje přeměnu střídavého napětí ze sítě na stejnosměrné napětí, které slouží k dobíjení baterie. [8]
- **Baterie:** Obsahuje několik bateriových článků, kterých je podle potřebného času na zálohování. Nejčastěji v UPS nalezneme bezobslužné uzavřené akumulátorové články. [8]
- **Střídač:** Zajišťuje přeměnu stejnosměrného napětí z baterie na střídavé napětí napájecí spotřebič z jednotky UPS. Je tvořen tranzistorem generujícím střídavé sinusové napětí, které obsahuje harmonické (výrobce by měl

garantovat, že obsah harmonických nepřekročí limitní meze nežádoucí pro rozvodnou síť a pro ostatní spotřebiče) [8]

- **Spínané napájecí zdroje**

Spínané napájecí zdroje se stali nedílnou součástí všech zařízení, které vyžadují změnu velikosti stejnosměrného napětí. Dříve používané síťové transformátory a usměrňovače z dnešního pohledu zdaleka nedostačují požadavkům na rozměry, váhu ale hlavně účinnost a cenu. Spínaný zdroj nejprve usměrní síťové napětí pomocí můstkového usměrňovače a následně je toto napětí vyhlazeno kondenzátorem. Poté je napětí znovu převedeno na střídavé spínacími tranzistory, ale o frekvenci v řádek kHz. Toto napětí je transformováno malým transformátorem s feritovým jádrem a znovu usměrněno a připraveno k použití. [3]

Nevýhodou spínaných zdrojů je odběr pulsujícího proudu s velkým obsahem harmonických vyšších řádů. Filtr, jenž je umístěn přímo ve spínaném zdroji nemá vůbec žádný vliv na omezení vyšších harmonických řádů pronikajících zpětně do rozvodné sítě. [3]

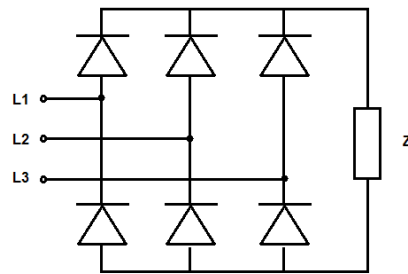


Obr. 2.8 Spektrum harmonických běžného počítače [3]

Trojfázové spotřebiče:

- Elektronické regulační pohony
- Velké UPS

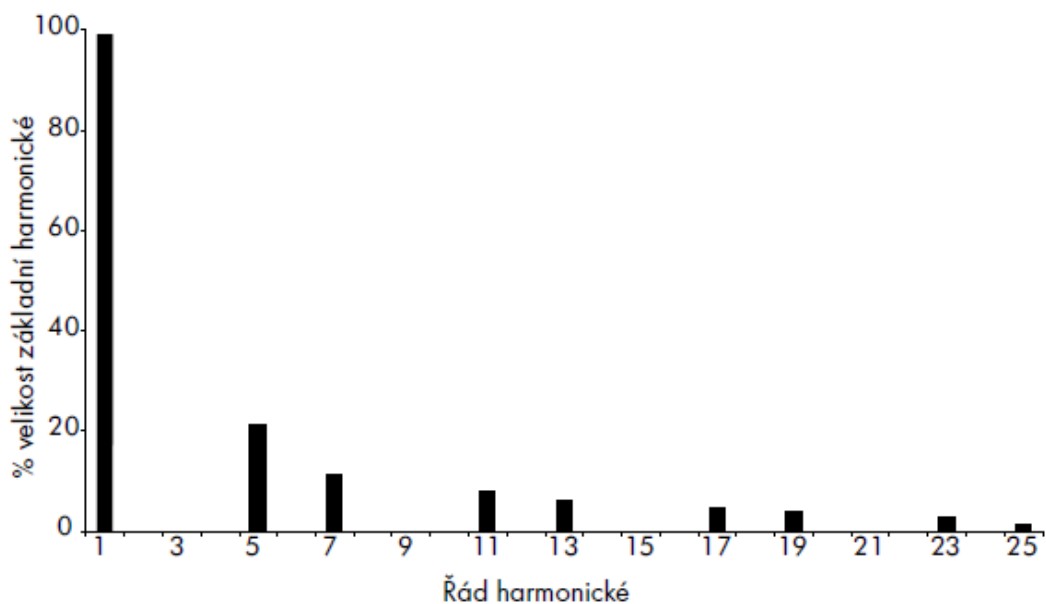
Jak elektrické regulátory pohonů, tak velké UPS jednotky fungují jako trojfázový můstek.



Obr. 2.9 Trojfázový můstek

Na obrázku 2.9 je vidět, že trojfázový můstek obsahuje 6 usměrňovacích diod a můstek se tak i nazývá 6-ti pulsní neboť generuje 6 pulsů během jedné periody. [3]

Trojfázový můstek vytváří harmonické kolem šestinásobku základní harmonické (o jeden řád vyšší harmonickou a o jeden řád nižší harmonickou). Názorně je to vidět na obrázku 2.10. Velikost harmonických klesá s velikostí řádu harmonické. [3]



Obr. 2.10 Spektrum harmonických generovaných trojfázovým můstkem [3]

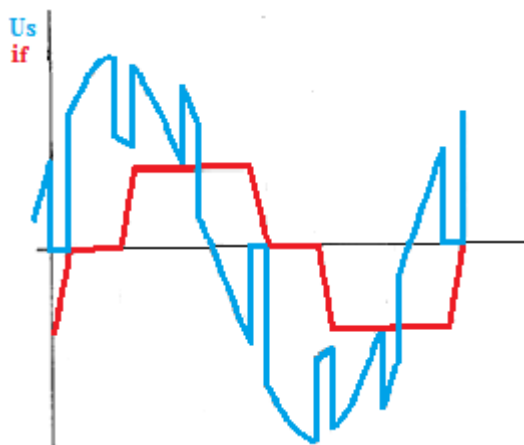
Omezit harmonické lze použitím dvou 6-ti pulsních můstků, které jsou napájeny transformátorem se zapojeným vinutím do Y/Δ a fázový posuv mezi těmito vinutími činí 30° . Zapojením pak vznikne 12-ti pulsní můstek. Jeli třeba ještě více omezit generování harmonických, je možnost použít zapojení dvou 12-ti pulsních můstků a tím vytvoření můstku

s 24 pulsy. S narůstající hodnotou pulsů můstku roste značně i jeho cena. Můstky s 24 pulsy za jednu periodu jsou tak používány v místech, kde je maximální snaha omezit generování harmonických. [3]

2.3.6 Vznik harmonických

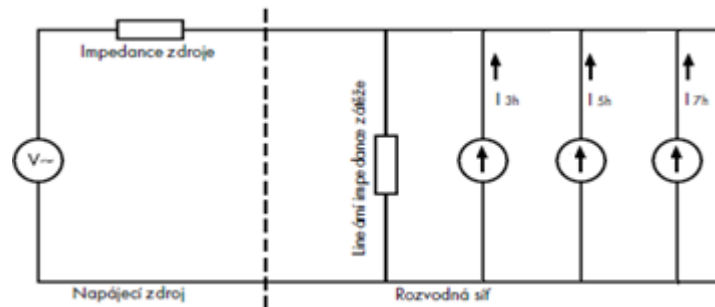
V dokonalé síti má napětí a proud čistý tvar sinusovky. Takovýto tvar je pouze na čistě odporové zátěži. Bude-li se v obvodu nacházet indukčnost či kapacita dojde k fázovému posunu. Pro cívku to znamená, že napětí předbíhá proud a to o 90° . U kondenzátoru je tomu naopak a napětí se zpožďuje za proudem o 90° . Má-li napětí a proud čistě sinusový tvar, popřípadě s fázovým posuvem ať již způsobený indukčností nebo kapacitou, je spotřebič lineárního charakteru. A nedochází ke vzniku harmonických.

U nelineárních spotřebičů bohužel už takto „čistý“ průběh napětí a proudu není. Nelineární spotřebiče vytváří harmonický proud, který teče zpět ke zdroji. Harmonická napětí vznikají na impedanci, přes kterou protéká harmonický proud. Nelineární zátěž je možné definovat jako impedanci, jejíž velikost se mění v čase periody síťového kmitočtu. Nelineární spotřebiče, jako například spínané zdroje (dvoucestný usměrňovač a kondenzátor) propouští pouze špičkové hodnoty napětí, čímž dochází k deformaci průběhu proudu, jak ukazuje obrázek 2.11. Ten pak lze rozložit na více průběhů o různých frekvencích (harmonických) jak ukazuje obrázek 2.6.



Obr. 2.11 Zdeformovaný průběh napětí a proudu polovodičovým měničem [11]

Nelineární spotřebiče generují převážně pouze liché harmonické. Sudé harmonické se nevyskytují již v takové míře, jelikož se tolik nepoužívají jednocestné usměrňovače.



Obr. 2.12 Náhradní schéma nelineárního spotřebiče [3]

2.3.7 Problémy způsobené harmonickými proudy

- **Skinefekt**

Je známo, že střídavý proud nejvíce protéká po obvodu vodiče. Se zvyšujícím kmitočtem se skinefekt projevuje ještě více. Skinefekt se projevuje minimálně při základním kmitočtu, ale s jeho nárůstem způsobuje skinefekt oteplení a další ztráty. Od 7. harmonické a dále by se již při projektování kabelů, mělo o vlivu skinefektu uvažovat. [3]

- **Přehřátí transformátorů**

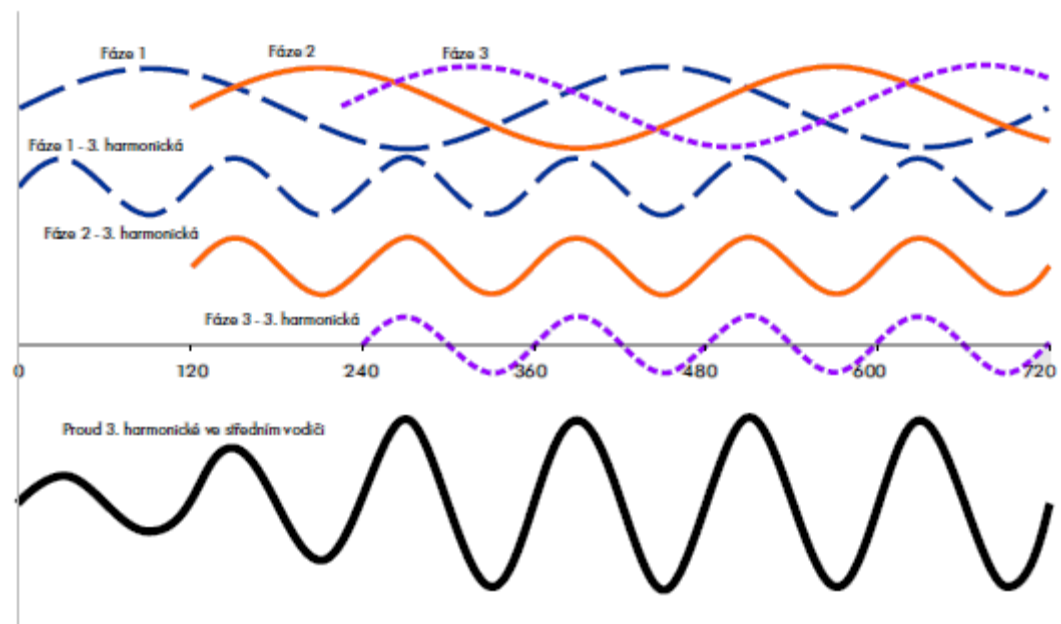
Ztráty vířivými proudy jsou při 100% zatížení transformátoru kolem 10%. Pokud je transformátor ovlivňován harmonickými, rostou ztráty vířivými proudy s kvadrátem řádu harmonických. Pokud by byl transformátor zatěžován čistě nelineární zátěží, budou ztráty dvakrát větší oproti tomu, pokud by byl transformátor zatěžován lineární zátěží. Transformátor by se přehříval a tím by se výrazně zkrátila jeho životnost. [3]

- **Přetížení středního vodiče**

V trojfázovém rozvodu protéká středním vodičem fázový součet proudů. Je-li trojfázový rozvod zatížen symetrickou zátěží, středním vodiče žádný proud neprotéká. Pokud není zatížení symetrické, začne středním vodičem protékat proud, jenž je roven vektorovému součtu proudů fázových vodičů. Jelikož proud tekoucí středním vodičem při nesymetrickém zatížení je menší než proud fázovými vodiči, začal se průřez středního vodiče z ekonomických důvodů zmenšovat. [3]

Problém nastává, vyskytují-li se v obvodu harmonické proudy (proudy třetí harmonické a násobky její). Středním vodičem začne protékat 70% proudu

3.harmonické od každé fáze což při součtu dává 210% velikosti proudu, který teče středním vodičem oproti proudu tekoucím fázovým vodičem. Studie uvádějí 150% až 210% velikosti fázového proudu, který se může objevit v kabelu s menším průřezem středního vodiče oproti fázovým vodičům. Projevem je přetížení středního vodiče a tím jeho přehřívání, což by mohlo vést k porušení izolace. Možnost předejít poničení izolace je zvýšení průřezu středního vodiče nebo vedení dvou paralelních vodičů. Pro projektanty je tato situace velmi nepříjemná a proto musí dobře znát, jaké poměry (výskyt harmonických) se nacházejí v síti. [3]



Obr. 2.13 Součet proudů středním vodičem při 3.harmonické proudu

- **Rušení při spínání vypínačů**

Problém se týká především proudových chráničů, které jsou založeny na principu přerušování obvodu, jestliže dojde k odchylce velikosti proudu tekoucího fázovými vodiči a středním vodičem. Vyskytují se v obvodu harmonické, je třeba, aby proudový chránič správně prováděl součet harmonických proudů a nedošlo tak ke špatnému vyhodnocení. Další překážkou ke správné funkci proudových chráničů nejsou až tak samotné harmonické, ale prvky omezující spínací poruchy, generované zařízeními, produkující harmonické proudy, čím jsou filtry. Tyto filtry obsahují kondenzátory umístěné mezi fázemi, nulovým vodičem a středním vodičem, které generují svodový proud. Svodové proudy bývají obecně velmi malé, pokud by se ale jejich hodnota blížila hodnotě 3,5 mA, což je limitní proud pro vybavení proudového chrániče, mohlo by dojít k ovlivnění jeho správného chodu. [3]

- **Přetěžování kompenzačních kondenzátorů**

Kompenzační kondenzátory se používají ke zlepšení účinníku v síti. Mnoho spotřebičů je induktivního charakteru (motory) čímž dochází ke zhoršení účinníku v síti. Zhoršení účinníku má vliv na zvýšený úbytek napětí v síti, ztráty a zvýšení zdánlivého výkonu čímž se snižuje možnost většího zatížení vedení. S výskytem harmonických vyšších řádů dochází ke snížení impedance kondenzátorů (naopak impedance sítě roste) a pokud by kondenzátor nebyl správně dimenzován, mohlo by dojít k jeho poškození. Velmi podstatným problémem zde může být existence rezonance indukčnosti sítě a kapacity kompenzačních kondenzátorů. Ta nastává okolo harmonických kmitočtů. Rezonance může způsobit značné zvýšení proudu nebo napětí a tím poškození kompenzačních kondenzátorů. [3]

2.3.8 Problémy způsobené harmonickými napětími

- **Zkreslení napětí**

Dojde-li ke vzniku harmonických proudů vlivem nelineárních spotřebičů, dochází ke vzniku harmonických napětí na impedanci sítě. Pokud je tedy snaha omezit vznik harmonických napětí, je dobré co nejvíce snížit impedanci napájecí sítě (problém je, ale se zkratovým proudem sítě, jelikož čím menší impedance tím větší zkratový proud, je tedy nutné hledat kompromisy). Harmonická napětí následně způsobují harmonické zkreslení (deformaci) napájecího napětí. [3]

Jako opatření je možnost oddělit obvody se zátěžemi citlivými na tvar napětí od nelineárních spotřebičů vytvářejících harmonické proudy. Pokud se počítá s instalací napájecího transformátoru pro síť se značným výskytem harmonického zkreslení napětí je vhodné tento transformátor značně předdimenzovat. [3]

- **Zvýšení ztrát indukčních motorů**

Dochází ke zvýšení ztrát vířivými proudy. Harmonické vznikající ve statoru zapříčiňují pohyb motoru nerovnoměrnou rychlostí ať již ve směru otáčení či proti. Je-li při návrhu motoru uvažováno zkreslení napětí způsobeno harmonickými, musí se to projevit do správného dimenzování motoru. [3]

2.4 Meziharmonické

V dnešní době je možné v síti také naměřit „nižší harmonické“ což je zvláštní druh meziharmonických ale jejich frekvence je nižší než frekvence základní harmonické. [4]

Definice meziharmonických podle normy IEC 61000-2-1 zní takto: „Mezi harmonickými napětí a proudu napájecího kmitočtu lze pozorovat další kmitočty, které nejsou celočíselným násobkem kmitočtu základního. Mohou se objevovat jako nespojitě kmitočty nebo jako širokopásmové spektrum“. Meziharmonické se v síti vyskytovali vždy, ale v poslední době došlo k jejich značnému nárůstu a to značným používáním výkonových elektronických celků. [4]

2.4.1 Zdroje meziharmonických

Meziharmonické jsou vytvářeny jako postraní pásma zdrojového napětí s obsahem harmonických. To je způsobeno změnami velikosti harmonických či změnou fázového úhlu posunutí. K tomu dochází při častých změnách proudu, jenž způsobí rozkolísání napětí v síti. Dále ke vzniku meziharmonických dochází v případě spínačů u kterých spínací frekvence je odlišná od frekvence soustavy. Toto nastává u pulsně šířkové modulace (PWM) používané u konvertorů a cyklokonvertorů. [4]

- **Obloukové pece**

V závodech s výskytem obloukových pecí dochází ke značnému ovlivňování zařízení připojených na stejném rozvodu, ale i k ovlivňování samotných rozvodů. Obloukové pece taví kovovou vsázku pomocí elektrického oblouku, který vzniká mezi ní a elektrodami. Při tavení dochází k výrazným změnám impedance elektrického oblouku. Velikost impedance elektrického oblouku se neustále mění (např. při přerušení elektrického oblouku je impedance nekonečně velká zatímco při natavování vsázky je impedance skoro nulová) [2]

Obloukové pece způsobují kromě generování harmonických a meziharmonických způsobují dále i kolísání proudu, kterému ale lze celkem účinně zamezit použitím speciálních transformátorů pro napájení obloukových pecí. [2]

- **Svařovací zařízení**

Podobně jako obloukové pece vytvářejí spojitě spektrum. Svařování probíhá přibližně od

1 sekundy do 10 sekund. [3]

- **Elektrické motory**

Elektrické indukční motory generují ve statorových i rotorových železných drážkách meziharmonické jevy, které jsou nazývány drážkové harmonické. Nachází-li se motor v ustáleném chodu, nežádoucí frekvence se pohybují od 500 Hz do 2000 Hz. Při rozběhu motoru dochází k výraznému nárůstu těchto nežádoucích frekvencí. Na vznik meziharmonických má také značný vliv kvalita a preciznost při výrobě motoru, když například při nesouososti rotoru dochází ke generování meziharmonických. Problém nastává též u pohonů, jako jsou razicí stroje, pily, kompresory, buchary atd., které mají proměnné otáčky. [3]

- **HDO**

HDO neboli celým názvem systém dálkového ovládání. Hlavním faktorem, kterým se liší od ostatních zdrojů generujících ať již meziharmonické či harmonické je to, že signály HDO jsou vytvářeny záměrně a ne jako nežádoucí vedlejší účinek. Signály HDO slouží k přenosu informace od dodavatele elektrické energie k uživateli. Signál nese informaci o změně tarify či slouží k dálkovému spínání. Signál HDO, ale v síti způsobuje i řadu úskalí. Nejčastěji používaným kmitočtem na našem území je 216,66 Hz, jímž je pokryta většina území ČR. Vyskytují se zde ale i oblasti, kde jsou použity dva signály HDO o odlišných kmitočtech současně, jak je tomu například u Hradce Králové a na Pardubicku jejich velikosti jsou 1060 Hz a 216,66 Hz. Signál HDO je superponován na základní kmitočet 50 Hz, ale jeho velikost se jeví jako meziharmonická složka. Jeho základní velikost není nijak zásadně nebezpečná, ale vlivem rezonancí může dojít k značnému nárůstu meziharmonických. Aby tomuto předešlo, jsou v průmyslových rozvodech používány filtry signálu HDO. Filtr funguje tak že pro signál působí jako zátěž a tím dojde k útlumu signálu. Signál HDO přesto nezaniká, jelikož účinnost filtru HDO není neomezená, ale je dána jakostí tlumivky. [2]

2.4.2 Problémy způsobené meziharmonickými

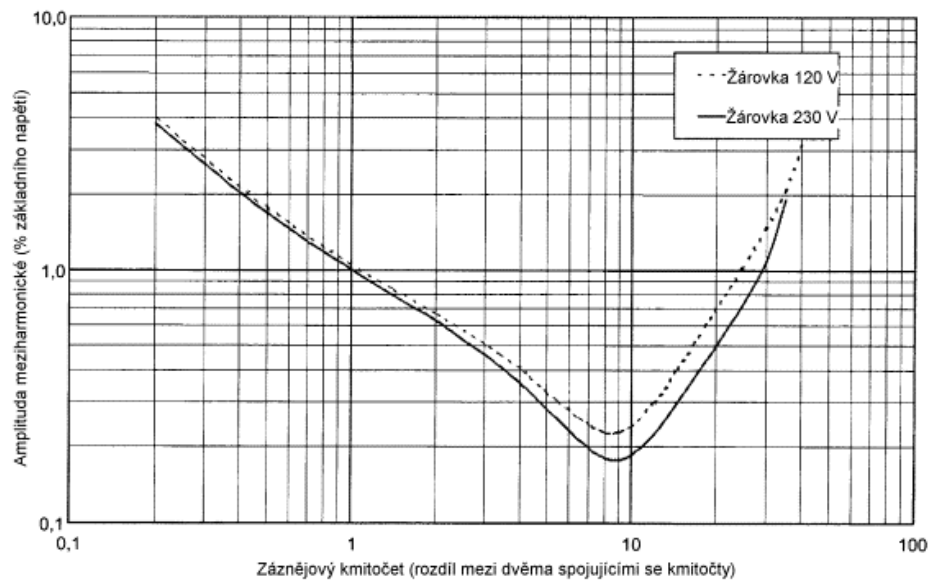
- **Fliker**

Fliker je často zaměňován s kolísáním napětí, ale to je chyba i když pravda není daleko. Kolísání napětí je způsobeno nerovnoměrným odběrem (změnou impedance). Flicker je projevem způsobeným kolísáním napětí. Flicker je definován normou IEC 61000 v souladu s IEC 60150 (161) nebo je také možno ho nazývat blikání, je jev, jenž negativně

působí na lidský organismus. Pro správnou funkci lidského organismu je důležité udržet zrakovou pohodu. Není-li zajištěna zraková pohoda, pro člověka to může znamenat nepříjemnosti jako zvýšená únava, která vede ke snížení pracovního výkonu. Nejvyšší stav nastává již při napěťové změně kolem 0,3% což vede k 1080 změnám za minutu (blikání), což je nejvíce nepříjemné pro lidské oko. Relativní změnu napětí lze vypočítat jako změnu výkonu odběratele ku zkratovému výkonu nebo povolená hodnota odchylky napětí ku sdruženému síťovému napětí: [2]

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} = \frac{\Delta S_A}{S_k} \tag{2.19}$$

Na obrázku 2.14 jsou vidět přípustné hladiny pro pravidelné pravoúhlé ustálené změny napětí pro žárovku, které mohou vyvolat zařízení (např. svářečky, kompresory).



Obr. 2.14 Přípustné hladiny pro pravoúhlé změny napětí pro žárovku [10]

Křivka na obrázku 2.14 udává přípustné fluktuace. Krátkodobý faktor blikání $P_{st}=1$ měřený v 10 minutových rozestupech udává křivku na obrázku 2.14. Všechny hodnoty nacházející se pod křivkou s $P_{st}<1$ jsou vyhovující. Nachází-li se hodnoty nad mezní křivkou tedy s $P_{st}>1$ jsou nevyhovující. Pro krátkodobé blikání je výpočet krátkodobé míry vjemu blikání: [2]

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}} \tag{2.20}$$

Určuje-li se hodnota P_{st} je spotřebič zkoušen s periodou sledování 10 minut. P_1 až P_{50s} jsou percentily. Percentily jsou hladiny blikání překročené po 0.1, 1, 3, 10, 50 % doby během

10 minut sledování. [2]

Pro některá zařízení perioda 10 minut nedostačuje, jelikož je třeba uvažovat zdroje blikání s dlouhým pracovním cyklem či účinky od více zdrojů blikání. Pro dlouhodobé blikání je výpočet dlouhodobé míry vjemu blikání: [2]

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \quad (2.21)$$

3 Možnosti omezení harmonických

Technická omezení jak zamezit ať již vzniku či následnému šíření vyšších harmonických jsou již na vysoké technické úrovni, přesto není ještě zcela možné se vyšší harmonických zbavit. Základní věc, kterou si musí projektanti uvědomit před začátkem omezování vyšších harmonických je, zda vůbec jejich existence v daném místě vadí či nikoli. Jestliže vadí tak jaké finanční úspory bude dosaženo po provedení opatření omezující vyšší harmonické a zdali má význam vynaložit finance na jejich pořízení. Omezit vyšší harmonické lze dvěma způsoby a to s použitím přídavných zařízení či bez použití přídavných zařízení.

3.1 Filtračně kompenzační zařízení

3.1.1 Kompenzace účinníku

Zařízení nacházející se v elektrické síti lze rozdělit podle toho, zda jsou ohmického, induktivního nebo kapacitního charakteru. Spotřebiče ohmického charakteru využívají pouze činnou (užitečnou) složku elektrické energie. Většina spotřebičů má induktivní charakter a sním přichází jalová složka, kterou nelze nijak využít. Vyskytují-li se tak v síti spotřebiče induktivního charakteru musí se jalová složka energie vyrobit a následně přesunout ke spotřebiči. To způsobuje v sítích ztráty (teplo uvolňované do okolí). Z tohoto důvodu je velmi účelné použít kompenzační kondenzátor. Kompenzační kondenzátor vytváří kapacitní složku, která eliminuje induktivní složku. Výsledná impedance spotřebiče se pak projevuje jako ohmická. Potřebný kompenzační výkon kondenzátoru: [2]

$$Q_c = S_{sp} \cdot \cos\varphi_A (tg\varphi_A - tg\varphi_K) = P_{SP} \cdot (tg\varphi_A - tg\varphi_K) \quad (3.1)$$

Vztah 3.1 by platil za předpokladu konstantního činného příkonu a $\cos\varphi_A$. Tyto veličiny

bývají ale většinou proměnné a pak:

$$Q_{stř} = \frac{\beta(Q_{\Sigma} - P_{\Sigma} \cdot \operatorname{tg}(\operatorname{arccos} \cos \varphi_{stř}))}{\gamma} = \frac{\beta}{\gamma} \cdot Q_k \quad (3.2)$$

Použití kompenzačního zařízení se ušetří ztráty:

$$\Delta P_{u\%} = (\Delta P_A - \Delta P_K) \frac{100}{\Delta P_A} = 100 \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_A}{\cos^2 \varphi_K} \right) \quad (3.3)$$

3.1.2 Kompenzační zařízení lze do sítě umístit několika způsoby

- **Individuální kompenzace** - kompenzační zařízení je umístěno přímo u kompenzovaného spotřebiče. Tato kompenzace je nejlepší, protože je kompenzován celý úsek mezi zdrojem a spotřebičem. [2]
- **Skupinová kompenzace** – kompenzační zařízení je umístěno v rozvaděči, odkud jsou napájené kompenzované spotřebiče. Kompenzovaný úsek je mezi zdrojem a rozvaděčem. [2]
- **Centrální kompenzace** – kompenzační zařízení je umístěno v blízkosti transformátoru napájecího např. průmyslový závod. Kompenzovaný úsek je mezi zdrojem a transformátorem. [2]
- **Kombinovaná kompenzace** - Kombinace individuální kompenzace a centrální kompenzace. [2]

3.1.3 Samostatné kondenzátory

Výkon jednofázového kondenzátoru je dán podle:

$$Q_c = \omega C U^2 = \frac{I^2}{\omega C} \quad (3.4)$$

Ztráty značně ovlivňují kvalitu kompenzačních kondenzátorů. Kompenzuje-li se nelineární spotřebič generující harmonické, je nutné zahrnout ztráty všech harmonických:

$$P_Z = \sum_{h=1}^{\infty} h \cdot Q_h \cdot \operatorname{tg} \delta_h = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum h \cdot U_h^2 \cdot f_h \cdot \operatorname{tg} \delta_h \quad (3.5)$$

Kompenzaci v místech s výskytem harmonických komplikuje fakt, že impedance

kondenzátoru se snižuje s rostoucí frekvencí. Snížená impedance umožní průtok zvýšeného proudu oproti normálnímu stavu a dojde k přetížení kondenzátoru až jeho možnému poškození. Samostatné kompenzační kondenzátory by se tak měli používat v místech kde procentuální podíl na celkovém výkonu transformátoru je 10-15% z pohledu spotřebičů generující harmonické (nelineárních spotřebičů). [2]

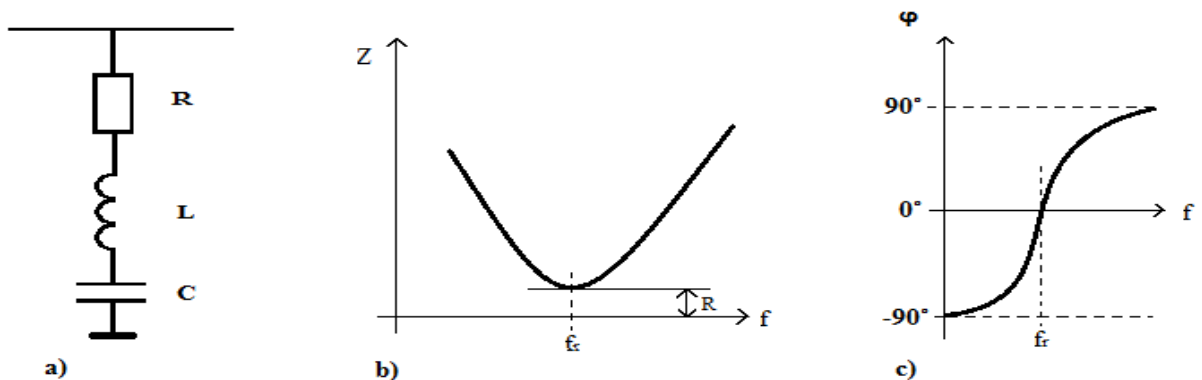
3.1.4 Chráněné kompenzační kondenzátory

Chráněná kompenzace oproti samostatným kompenzačním kondenzátorům se skládá z RLC prvků. Lze říci, že chráněná kompenzace je velice podobná FKZ s tím rozdílem, že chráněná kompenzace se orientuje převážně na kompenzační vlastnosti. Není třeba ji dimenzovat na takový výkon jako nechráněnou kompenzaci při zajištění ještě vyšší spolehlivosti a životnosti. [2]

3.1.5 FKZ

Filtračně kompenzační zařízení má za úkol jednak filtrovat vyšší harmonické proudy tak i kompenzovat zhoršení účinníku induktivními spotřebiči. [2]

FKZ je jednoduchý laděný pasivní filtr, jenž se skládá ze sériového RLC obvodu (paralelní zapojení se používá jen pro pár speciálních případů). Schéma takového jednoduchého filtru je na obrázku 3.1 společně s amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristikou



Obr. 3.1 a) RLC obvod b) Amplitudová frekvenční charakteristika c) Fázová frekvenční

Z amplitudové charakteristiky na obrázku 3.1 je vidět, že pro kmitočet okolo základní frekvence se filtr chová jako kompenzační zařízení. Při rezonanční frekvenci jeho impedance klesá k nule (omezeno odporem cívky) a filtr tak působí v obvodu jako zkrat a „odsává“ harmonické frekvence z obvodu. Pasivní filtr obsahuje několik takových RLC obvodů jako na

obrázku 3.1, kde každý z nich je vyladěn na frekvenci harmonické, kterou má „odstávat“ z obvodu. Resonanční frekvence, při které dochází k filtraci lze určit podle vztahu: [2] [5]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.6)$$

3.1.6 Přínos FKZ pro stabilizaci napětí v síti.

Vyhodnocování přínosu FKZ je nutné dělat jak z pohledu kompenzačních účinků, tak i účinků filtračních. [2]

- **Kompenzační účinek filtrů**

$$\rho_K = \frac{\Delta U_{1F}}{\Delta U_1} = \sqrt{\frac{I_{\xi 1F}^2 + I_{j 1F}^2}{I_{\xi 1}^2 + I_{j 1}^2}} \quad (3.7)$$

Za předpokladu, že činná složka proudu bude neměnná, lze dojít k následujícímu vztahu pro kompenzační účinek filtrů:

$$\rho_K = \frac{I_{\xi 1}^2 + I_{j 1F}^2}{I_{\xi 1}^2 + I_{j 1}^2} = \frac{I_{1F}}{I_1} = \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_{1F}} \quad (3.8)$$

- **Filtrační účinek filtrů**

Zjištění filtračního účinku je nejen dobré pro následné zhodnocení provedené filtrace, ale je i potřeba k porovnání s dovolenými hodnotami napěťového zkreslení danými normou. Z tohoto důvodu je potřeba filtračním účinkem vyjádřit, jakého snížení harmonických napětí se s použitím filtru podařilo dosáhnout. [2]

Harmonické vzniklé nelineárním spotřebičem:

$$HC = \sqrt{\sum_{h=2}^H Q_h^2} = \Delta U_H \quad (3.9)$$

ΔU_H je úbytek napětí vzniklý působením nelineárního spotřebiče. Tento úbytek provedením vhodné filtrace lze snížit.

Úbytek napětí v rozvodu je pak:

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_1^2 + \Delta U_H^2} \quad (3.10)$$

Je-li snaha omezit celkový úbytek napětí v rozvodu, pak je to možné právě použitím filtru a omezením úbytku napětí způsobeným nelineárním spotřebičem ΔU_H .

Filtrační účinek filtrů:

$$\rho_F = \frac{U_{hF}}{U_h} = \frac{Z_{SF}}{Z_S} \quad (3.11)$$

Je-li filtr sériově zapojený RLC obvod, lze filtrační účinek vyjádřit pomocí reaktancí a filtrů:

$$\rho_F = \frac{R_F}{(R_S + R_F)^2 + X_S^2} \quad (3.12)$$

Výsledný vztah pro celkový činitel filtrace je:

$$\rho_{F_{celk}} = \frac{\Delta U_{HF}}{\Delta U_H} = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_{hF}^2}{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}} \quad (3.13)$$

- **Celkové zhodnocení vlivu FKZ na síť**

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_{1F}^2 + \Delta U_{HF}^2} = \sqrt{(\rho_K \Delta U_1)^2 + (\rho_F \Delta U_H)^2} \leq \Delta U \quad (3.14)$$

3.2 Aktivní filtry

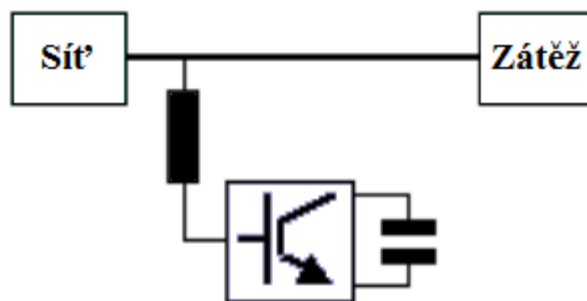
V elektroinstalacích není někdy snadné předvídat, jaké harmonické se tam právě vyskytnou, jelikož jsou často připojována nová zařízení či dochází ke změně umístění. Proto, je třeba použít zařízení, které bude pružně reagovat na různý výskyt harmonických v obvodu. Takovým zařízením jsou právě aktivní filtry. Aktivní filtry si lze zjednodušeně představit jako zařízení dorovnávací výchytky sinusového průběhu. Hlavní součástí je zařízení generující opačné zbytkové křivky, které vzniknou použitím nelineárních spotřebičů. Začátek používání

aktivních filtrů přišel až s příchodem moderních elektronických a výkonových prvků. Je možné provádět filtrování jak harmonických napětí, tak i harmonických proudů, ale i harmonických napětí a proudů současně. Podle toho, která složka má být filtrována je provedeno zapojení aktivní filtrace do obvodu [2]

3.2.1 Paralelní aktivní filtr

Jak už název napovídá paralelní aktivní filtr je k zátěži připojen paralelně. Je to zařízení, jenž neustále dodává harmonické proudy. Tyto harmonické proudy odpovídají přesnému opaku směru harmonických proudům vzniklým působením nelineární zátěže. Výsledkem je proud, oprostěn od harmonických, vyfiltrovaných paralelním aktivním filtrem. Paralelní aktivní filtr filtruje proud odebíraný ze sítě a upravuje také napětí zdeformované nelineární zátěží. Jsou prováděny velice rychlé změny kompenzace jalového proudu vyvoláváním jalové složky první harmonické proudu. [2]

Generátor impulsů je vytvořen z můstkového zapojení IGBT tranzistorů. Požadovaný obraz proudu je vytvářen účelným spínáním jednotlivých tranzistorů. Než je tento proud připojen k napájecí síti nelineární zátěže, musí projít přes pevný filtr typu dolní propust, jelikož se v tomto proudu vyskytuje mnoho harmonických v okruhu spínacích frekvencí. [2]



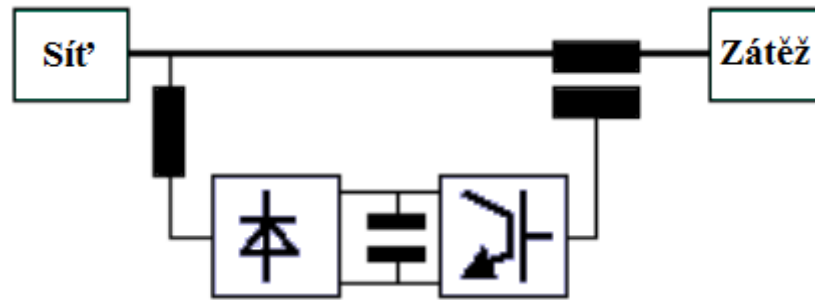
Obr. 3.2 Paralelní aktivní filtr a jeho připojení k soustavě [2]

Na obrázku 3.2 je vidět zapojení paralelního aktivního filtru kde proud z filtru teče do jednoho uzlu a přičítá k proudu s obsahem harmonických tekoucího zpět do sítě tak, aby tento proud tekoucí do sítě obsahoval minimum harmonických. [2]

Řídicí systémy v paralelních aktivních filtrech jsou velmi náročné na výpočetní techniku a to jak software, tak i hardware. Musí být zajištěna velmi přesná a rychlá regulace. Pokud by byl požadavek na čistě sinusový odběr proudu, bylo by to značně nákladné, proto se přistupuje pouze k regulaci, kdy jsou harmonické upraveny do přijatelných mezí. [2]

3.2.2 Sériový aktivní filtr

Sériový aktivní filtr je připojen do obvodu sériově mezi sítí a zátěží. Tento aktivní filtr obsahuje generátor generující napětí. Toto generované napětí upravuje tvar napětí přicházejícího ze sítě do zátěže. Na rozdíl od paralelního aktivního filtru u sériového aktivního filtru dochází k vylepšování tvaru napětí. Aktivní sériový filtr svým vylepšením udržuje amplitudu napětí a kryje jeho špičky a úbytky a odstraňuje harmonické. [2]



Obr. 3.3 Sériový aktivní filtr a jeho připojení k soustavě [2]

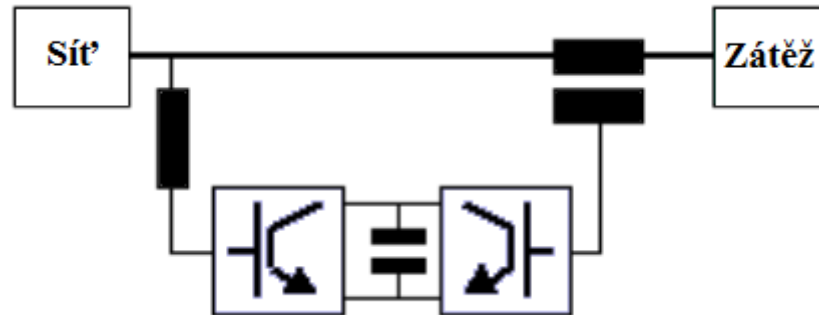
Ovládací obvod aktivních sériových filtrů ovládá tři nezávislé tranzistorové můstky. Výkon jádra řídicího procesoru není třeba tak velký jako u paralelních aktivních filtrů. Toto platí pouze, není-li u sériových aktivních filtrů vyžadována regulace tvaru napětí. Je-li tomu naopak a regulace tvaru napětí je vyžadována, nároky na výkon řídicího procesoru značně narostou, jelikož je třeba kompenzovat harmonické v reálném čase. Musí být zajištěn přenos signálu HDO ke spotřebiči. [2]

Sériové aktivní filtry jsou nasazovány v místech, kde by nekvalitní elektrická energie mohla způsobit značné škody ať již finanční (banky) nebo na lidském zdraví (nemocnice). Používány jsou i na vzdálených koncích napájecí sítě, kde dodavatel elektrické energie má problémy s udržení její kvality. [2]

Rozdíl mezi sériovým a paralelním aktivním filtrem je ve směru, kterým upravovaná elektrická energie nadále teče. Zatímco sériové aktivní filtry upravují kvalitu elektrické energie pro spotřebič, tedy upravují elektrickou energii dodávanou ze sítě, paralelní aktivní filtry upravující kvalitu, vykompenzovávají rušivé účinky nelineárních spotřebičů zpět na napájecí síť. [2]

3.2.3 Kombinovaný aktivní filtr

Kombinovaný aktivní filtr vznikne kombinací sériového a paralelního aktivního filtru. Toto spojení dává aktivnímu kombinovanému filtru vlastnosti od obou filtrů navzájem a to jak vylepšení kvality napětí tak i vylepšení průběhu odebíraného proudu. Používány jsou u tzv. kondicionérů vyšších výkonů. [2]



Obr. 3.4 Kombinovaný aktivní filtr a jeho připojení k soustavě [2]

3.2.4 Způsoby filtrace harmonických

- **Odfiltrování celého spektra harmonických proudů**

Je vyhladěno veškeré spektrum harmonických (od 2. po 13. harmonickou) Regulátor filtru se snaží, aby na výstupu byl generován sinusový proud. [2]

- **Odfiltrování či omezení pouze vybraných harmonických proudů**

Sníženy nebo zcela odstraněny harmonické proudy jsou pouze u vybraných harmonických proudů. Z důvodu neomezené kapacity výpočetního procesoru filtru bývá počet vybraných harmonických omezen. [2]

- **Zmenšení vybraných harmonických napětí**

Filtr reguluje harmonické napětí pomocí filtrování proudu zátěže. Filtr nezapůsobí, dokud harmonické napětí nepřekročí hraniční hodnoty. [2]

3.2.5 Způsoby kompenzace účinníku pomocí aktivních filtrů

- **Kompenzace účinníku pouze aktivním filtrem**

V místech s potřebou rychle a přesné kompenzace se využívají pouze aktivní filtry. Kompenzuje-li se pouze pomocí aktivního filtru, je možné dosáhnout krátkých přetížení.

Výhodou toho, že kompenzace účinníku je velmi rychlá je možnost omezení flickeru. [2]

- **Kompenzace účinníku aktivním filtrem společně se statickým kompenzátořem**

Není-li vyžadována dynamická kompenzace (reakce na rychle se měnící jalový výkon) je kombinace aktivního filtru společně se statickým kompenzátořem výhodnější z hlediska ceny. Statický kompenzátoř slouží ke kompenzaci účinníku po větších skocích a následně dochází k doladění aktivním filtrem na požadovanou hodnotu. [2]

Závěr

V dané práci jsou popsány problémy způsobené nelineárními spotřebiči v soustavě nízkého napětí a možnosti jejich omezení či odstranění.

První kapitola popisuje síť nízkého napětí. Topologie sítě nízkého napětí je různorodá. Často platí úměra, čím hustší osídlení oblasti, tím složitější síť s více napájecími body a tím i vyšší spolehlivostí a nižšími poklesy napětí. Oproti tomu, ale dochází ke zhoršení zkratových poměrů. Bude-li tak požadavek na spolehlivost dodávky elektrické energie, bude potřeba více zdrojů napájení a přírodních vedení a vznikne mřížová síť. Naopak bude-li kladen důraz na přehlednost sítě a co nejmenší zkratové poměry vznikne paprsková síť. Sítě nízkého napětí jsou konstruovány jak pomocí kabelových vedení, tak i venkovních vedení. Co se týká spolehlivosti, je těžké určit, zda je spolehlivější kabelové či venkovní vedení. U venkovního vedení je sice výskyt poruch mnohem častější než u kabelového, ale porucha lze snadněji vyhledat a na rozdíl od kabelového vedení nebývá trvalého charakteru. Uzel sítě nízkého napětí je účinně uzemněn.

Ve druhé kapitole jsou popsány nelineární spotřebiče a negativní vlivy způsobené jejich působením v síti nízkého napětí. Působením nelineárních spotřebičů dochází ke generování harmonických (meziharmonických) proudů. Následkem toho může dojít k přetěžování středního vodiče, skinefektu, přehřívání transformátorů, vlivu na spínání vypínačů, přetěžování kompenzačních zařízení, zvýšení ztrát indukčních motorů, zkreslení napětí a v neposlední řadě také nebezpečnému jevu flickr. Omezit či zcela zabránit těmto vlivům lze již při projektování elektrických rozvodů. Je možné oddělit nelineární spotřebiče generující rušení od přístrojů choulostivých na tato rušení. Dále je to co největší omezení šíření rušení omezením vazeb (galvanická, kapacitní, indukční). Omezení se provádí, ale i na straně samotných nelineárních spotřebičů, jak je tomu např. v případě nahrazování 6-ti pulsních můstků 12-ti pulsními či 24-pulsními.

Třetí kapitola nastiňuje princip kompenzace účinníku, ale hlavně se zaměřuje na pasivní a aktivní filtry. Zda zvolit aktivní či pasivní filtraci záleží na vlastnostech sítě, v níž filtry působí. Budou-li se v síti vyskytovat pouze předem definované harmonické, postačí použití pasivních filtrů, které jsou vyladěny každý zvlášť na jeden druh typické hodnoty harmonické.

Nebude-li tomu tak a výskyt harmonických nebude předem nemožné určit, poslouží zde aktivní filtry. Aktivní filtry jsou mnohem složitější zařízení oproti filtrům pasivním a z toho také vyplývá jejich výrazně vyšší pořizovací cena.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ŠTROBLOVA, Milada a HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Elektrické sítě městské a průmyslové*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. 149 s. ISBN 80-7082-154-X.
- [2] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. 196 s. ISBN 80-7082-976-1.
- [3] CHAPMAN, David. *Kvalita elektrické energie-průvodce, Harmonické-Příčiny a účinky* [online]. [cit. 2013-04-19].
Dostupné z: http://www.medportal.cz/files/file/3_1%281%29.pdf
- [4] HANZELKA, Zbigniew a BIENÍ, Andrej. *Kvalita elektrické energie-průvodce, Harmonické-Meziharmonické* [online]. [cit. 2013-04-19].
Dostupné z: http://www.medportal.cz/files/file/lpq_cz/3_1_1.pdf
- [5] FASSBINDER, Stefan. *Kvalita elektrické energie-průvodce, Harmonické-Pasivní filtry* [online]. [cit. 2013-04-19].
Dostupné z: http://www.medportal.cz/files/file/lpq_cz/3_3_1.pdf
- [6] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: Zdroje rušivých signálů a vazební mechanismy jejich přenosu* [online]. 2000 [cit. 2013-03-29]. ISSN 1213-1539.
Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00031/index.html>
- [7] ŽÁČEK, Jaroslav a KÜNZEL, Karel. *EMC v technické praxi II: Rušivé signály, jejich zdroje a šíření* [online]. 2006 [cit. 2013-04-30].
Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30991
- [8] ŽÁČEK, Jaroslav a KÜNZEL, Karel. *EMC v technické praxi III: Omezování rušení v oblasti nízkých kmitočtů* [online]. 2006 [cit. 2013-05-20].
Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31209
- [9] Portál MOJEENERGIE. *ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě* [online]. [cit. 2013-05-10].
Dostupné na <http://www.mojeenergie.cz/cz/csn-en-50160>
- [10] ŠMÍD, Jaroslav. *Aktualizace pojmů v oblasti kvality elektrické energie v návaznosti na mezinárodní normy* [online]. [cit. 2013-05-31].
Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~san50/Ceska/Normy/pojmy_kvality_energie.htm

- [11] Technická univerzita v Liberci, Ústav mechatroniky a technické informatiky.
Elektromagnetická kompatibilita [online]. [cit. 2013-06-01].
Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/vke/elmag_komp_nadproud_ochr.pdf