

# Kompenzácia vyšších harmonických v elektrických sieťach

Ing. Peter Gardian, peter.gardian@power-grid.eu

Power Grid, s.r.o.

Industrializáciou Slovenska spojenou s inštaláciou moderných technológií sa objavujú v elektrických sieťach v minulosti nepozorované problémy. Je takmer nemysliteľné prevádzkovať elektrické siete zaťažené modernými spotrebičmi a využívať pritom postupy, ktoré boli zaužívané v dobách, keď spotrebiče obsahovali napr. len minimálne množstvo výkonových polovodičových prvkov.

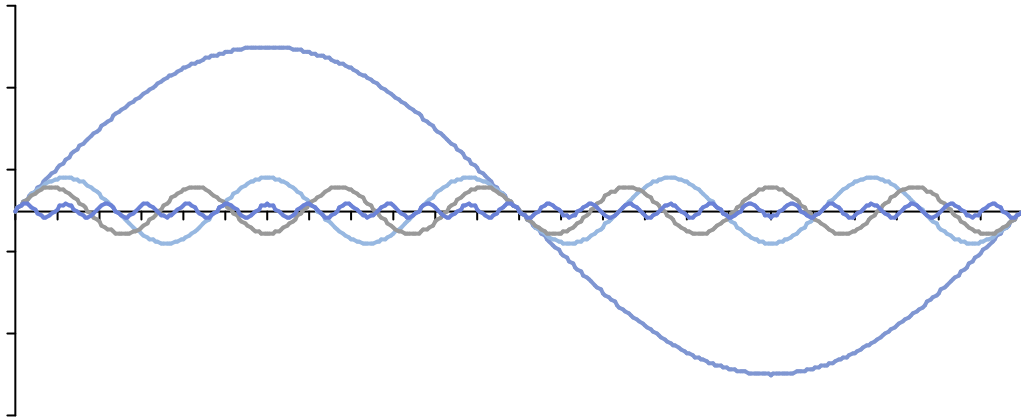
Problémy elektrickej siete majú v zásade 2 dôvody:

- Inštalácia nevhodného, resp. z pohľadu kvality elektrickej siete zlého spotrebiča do inak fungujúcej elektrickej siete spĺňajúcej normy
- Inštalácia spotrebiča do nevhodnej elektrickej siete (nesplňajúcej normy)

Výsledný efekt je však rovnaký - zariadenie, ktoré by malo prinášať pozitívny výsledok (napr. zisk), nebude fungovať podľa predstáv a navyše aj ostatné zariadenia napájané z rovnakej siete (transformátora), ktoré dovtedy fungovali bez problémov začnú „nefungovať“. Otázka od zákazníka býva v takýchto prípadoch jednoduchá – kto urobil chybu – výrobca zariadenia alebo je chyba u nás? Odpoveď už tak jednoduchá nie je a veľmi často nie je ani jednoznačná. Je však možnosť problémom predchádzať? Z pohľadu špecializovaných firiem, ktoré sa venujú kvalite elektrickej siete, meraniam a analýzam, prípadne návrhu zariadení, ktoré kvalitu siete zvyšujú, je takmer vždy problém predikovateľný a dá sa mu teda predísť. Je však nevyhnutné vždy venovať komplexnú pozornosť všetkým inštalovaným spotrebičom, zdrojom, vodičom a tiež zariadeniam, ktoré by mali s kvalitou siete „pomáhať – napr. kompenzačné jednotky.

Cieľom nasledujúceho textu je opísať len jeden z problémov, ktorý je, resp. u koho ešte nie, tak v blízkej dobe bude, a síce vyšším harmonickým prúdom a napätiam.

V zmysle normy EN50160, ktorá popisuje vlastnosti elektrického napätia v sieťach nízkeho a vysokého napätia, sú harmonické napätia chápané od druhej harmonickej (100 Hz) do päťdesiatej harmonickej (2500 Hz). Jednotlivé harmonické musia počas 95% času 10 minútového intervalu spĺňať limity pre každú jednotlivú harmonickú uvedenú v norme. Rovnako celkové harmonické skreslenie napätia THDU musí byť počas tohto intervalu < 8%.



Obr. 1. Základná harmonická a vyššie harmonické

Vyššie harmonické v elektrických sieťach rozlišujeme na harmonické prúdy a napätia. Princiipiálne pochopenie, čo vlastne vyššie harmonické sú je v oboch prípadoch rovnaké – okrem „základnej“ harmonickej – v našej krajine 50 Hz (či už napätia alebo prúdu) sa v elektrickej sieti vyskytujú aj napätia (prúdy) vyššej frekvencie. Ak je napätie (prúd) celočíselným násobkom základnej harmonickej – to znamená  $2 \times 50$  Hz,  $3 \times 50$  Hz, až  $50 \times 50$  Hz = 2.500 Hz, tak sa v zmysle normy považuje za vyššiu harmonickú (či už napätie alebo prúd).

Norma uvádza výšku jednotlivých zložiek harmonického napätia, ktoré musia byť na sieti dodržané. Hodnoty sú uvedené v tabuľke 1. Hodnota jednotlivej harmonickej je uvedená ako percentuálna hodnota k prvej harmonickej (50 Hz), takže ak napr. piatej harmonickej (250 Hz) je povolená hodnota v triede 3. 8%, tak v sieti s 230V 50 Hz môžeme namerať okrem tejto hodnoty aj 8% z 230V (to znamená 18.8V!) ale 250Hz. Rovnaká logika platí aj v prípade harmonických prúdov.

IEC 1000-2-2 Verträglichkeitspegel für öffentliche NS Netze				IEC 1000-2-2 Verträglichkeitspegel für öffentliche NS Netze			
IEC 1000-2-4 Verträglichkeitspegel für industrielle Netze				IEC 1000-2-4 Verträglichkeitspegel für industrielle Netze			
n	Klasse1	Klasse2	Klasse3	n	Klasse1	Klasse2	Klasse3
1				26	0,20	0,20	1,00
2	2,00	2,00	3,00	27	0,20	0,20	1,00
3	5,00	5,00	6,00	28	0,20	0,20	1,00
4	1,00	1,00	1,50	<b>29</b>	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>	<b>3,08</b>
<b>5</b>	<b>3,00</b>	<b>6,00</b>	<b>8,00</b>	30	0,20	0,20	1,00
6	0,50	0,50	1,00	<b>31</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	<b>2,98</b>
<b>7</b>	<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>7,00</b>	32	0,20	0,20	1,00
8	0,50	0,50	1,00	33	0,20	0,20	1,00
9	1,50	1,50	2,50	34	0,20	0,20	1,00
10	0,50	0,50	1,00	<b>35</b>	<b>0,56</b>	<b>0,56</b>	<b>2,80</b>
<b>11</b>	<b>3,00</b>	<b>3,50</b>	<b>5,00</b>	36	0,20	0,20	1,00
12	0,20	0,20	1,00	<b>37</b>	<b>0,54</b>	<b>0,54</b>	<b>2,73</b>
<b>13</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>4,50</b>	38	0,20	0,20	1,00
14	0,20	0,20	1,00	39	0,20	0,20	1,00
15	0,30	0,30	2,00	40	0,20	0,20	1,00
16	0,20	0,20	1,00	<b>41</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>2,59</b>
<b>17</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>4,00</b>	42	0,20	0,20	1,00
18	0,20	0,20	1,00	<b>43</b>	<b>0,49</b>	<b>0,49</b>	<b>2,53</b>
<b>19</b>	<b>1,50</b>	<b>1,50</b>	<b>4,00</b>	44	0,20	0,20	1,00
20	0,20	0,20	1,00	45	0,20	0,20	1,00
21	0,20	0,20	1,75	46	0,20	0,20	1,00
22	0,20	0,20	1,00	<b>47</b>	<b>0,46</b>	<b>0,46</b>	<b>2,42</b>
<b>23</b>	<b>1,50</b>	<b>1,50</b>	<b>3,50</b>	48	0,20	0,20	1,00
24	0,20	0,20	1,00	<b>49</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>	<b>2,37</b>
<b>25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,50</b>	<b>3,50</b>	50	0,20	0,20	1,00

Trieda 3 pre priemyselné siete s výkonnými frekvenčnými meničmi

Trieda 2 pre štandardné siete a verejné energetické siete

Trieda 1 pre citlivé prostredia (výpočtové strediská, nemocnice, ...)

Tabuľka 1. Povolené hodnoty harmonických napätí v elektrických sieťach

Parameter THDU a THDI (celkové harmonické skreslenie napätia, resp. prúdu)

vyjadruje celkový podiel harmonických napätí, resp. prúdov k základnej harmonickej. Pre výpočet platí:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} C_k^2}}{C_1}$$

Ako už bolo uvedené, pre THDU uvádza norma maximálnu prípustnú hodnotu 8%, za predpokladu, že nie je prekročená hodnota žiadnej jednotlivjej harmonickej zložky napätia. Pre prúd norma hodnotu maximálneho THDI, resp. jednotlivých zložiek neuvádza.

Harmonické prúdy spôsobujú nárast špičkovej a rovnako efektívnej hodnoty prúdu.

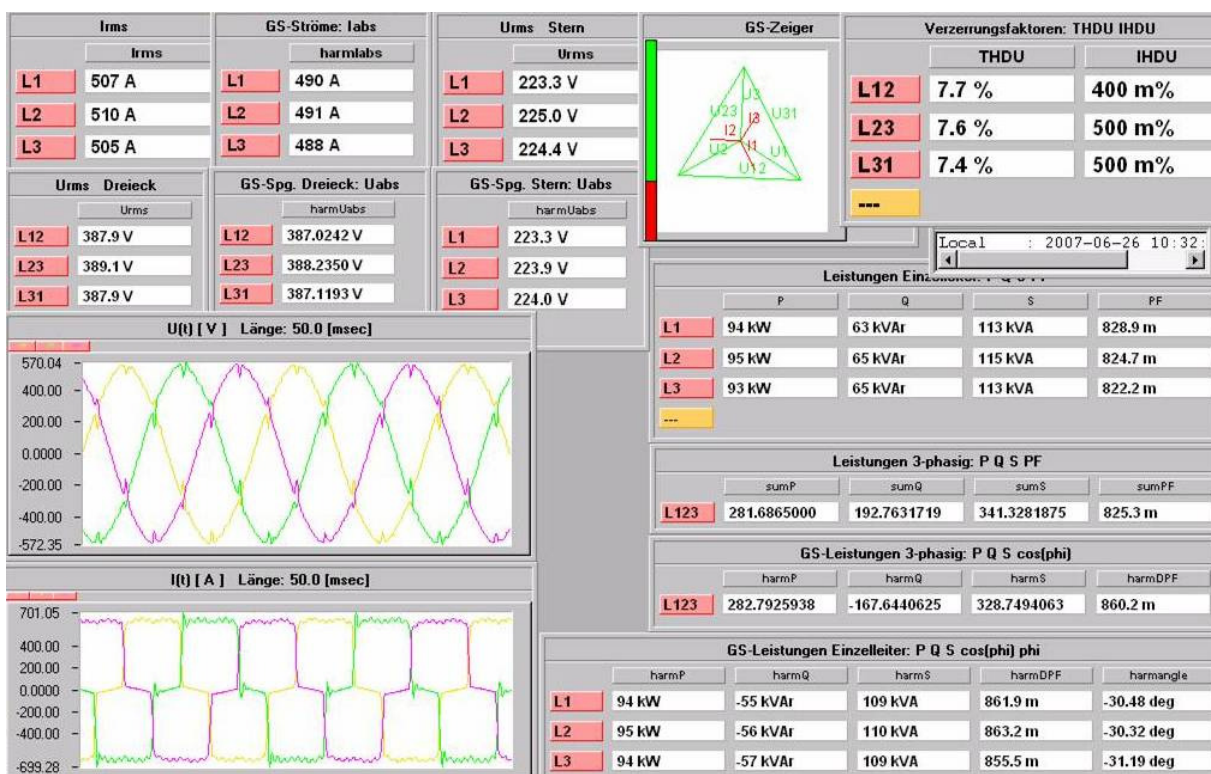
Tento nárast vzhľadom na nárast THDI je percentuálne vyjadrený v tabuľke 2.

THDI	0%	33%	39%	44%
Špičková hodnota prúdu	100%	133%	168%	204%
Efektívna hodnota prúdu RMS	100%	105%	108%	110%

Tabuľka 1

Nárast týchto veličín nemusí byť zrejмый pri použití jednoduchých meracích zariadení. Nie všetky meracie zariadenia totiž umožňujú meranie tzv. „True RMS“ veličín – to znamená meranie prúdu, resp. napätia postupnou integráciou a nie výpočtom zo strednej hodnoty.

Základom správnej identifikácie problému je analýza elektrickej siete. Analýza elektrickej siete dokáže okrem zmonitorovania všetkých výkonových charakteristík elektrickej siete (prúdy, napätia, výkony, účinník...) zmonitorovať aj prítomnosť harmonických napätí a prúdov, harmonické skreslenie napätia a prúdu. Moderné analyzátory elektrickej siete dokážu všetky merané veličiny zobrazovať, resp. ukladať do pamäte paralelne, čo je pri analýze dát veľmi podstatné, keďže aj zdanlivo nezaujímavé javy môžu významne ovplyvňovať riešenie problému. Na obrázku č. 2 je zobrazený jednoduchý príklad parametrov, ktoré je možné sledovať počas merania. Samozrejme, že pri spracovávaní výsledkov meraní sú k dispozícii všetky vlastnosti premietnuté v časovej osi.





Obr. 2

V súčasnej dobe sa nedajú z elektrickej siete vylúčiť zariadenia, ktoré môžu potenciálne spôsobovať problémy. Vyššie harmonické prúdy a následne aj vyššie harmonické napätia v elektrickej sieti, ktorým sa venuje tento materiál, produkuje každé zariadenie, ktoré obsahuje nelineárne prvky, napr. polovodiče.

Riešenie problémov s vyššími harmonickými by som rozložil do 3 stupňov, ktoré budú popísané ďalej v texte:

1. Predchádzanie problémom,
2. Nezhoršovanie problémov
3. Riešenie problémov.

Predchádzať problémom s harmonickými je teda možné, ak by výrobcovia zariadení doplnili svoje výrobky o filtre, ktoré by zabezpečili, aby zariadenie generovalo iba sínusový priebeh prúdu – to znamená bez harmonických zložiek. Konkurenčný boj a požiadavka na znižovanie cien však výrobcov zariadení väčšinou donúti, aj keď sú si vedomí následkov u zákazníka, filter do zariadenia neinštalovať. Je pravda, že pri určitom type zariadení by inštalácia filtra nebola ekonomicky výhodná – pri zariadeniach, kde by cena filtra prevýšila cenu zariadenia je výhodnejšie riešiť problém filtráciou skupiny zariadení.

Niekedy je finančne výhodnejšie časť siete – napr. jeden transformátor – vyčleniť pre zariadenia, o ktorých je zrejme že sieť znečisťujú, ale dokážu na nej spoľahlivo pracovať. Transformátor, ktorý ma prirodzenú vlastnosť filtrovať niektoré harmonické,

zabezpečí, že ďalšia sieť nebude znečistená. Takéto riešenie nemusí byť vždy možné a na jeho návrh treba poznať charakter elektrickej siete, spotrebičov – čo sa najlepšie overí meraním a následne na základe nameraných hodnôt a výpočtov sa určí riešenie.

Ak už inštalácia zariadenia má pokaziť kvalitu elektrickej siete – a keďže v štandardoch a normách je vždy povolená určitá hodnota harmonických, ktoré sa môžu s elektrickej siete vyskytovať, takže k zníženiu kvality elektrickej siete dôjde aj pri inštalácii zariadení, ktoré sú z pohľadu kvality siete na špičkovej úrovni – je chybou, a na Slovensku veľmi častou – kvalitu elektrickej siete ďalej zhoršovať inštaláciou nevhodných kompenzačných jednotiek. Ich zaťaženie harmonickými prúdmi môže spôsobiť ich deštrukciu, resp. výrazné skrátenie životnosti. Rovnako v prípade, že kompenzačný kondenzátor je použitý ako „nechránený“, čiže bez ochrannej filtračnej tlmivky, hrozí rezonancia medzi kondenzátorom a indukčnosťou celého systému. V takomto prípade zapojením kompenzačnej jednotky namiesto očakávaného zlepšenia kvality elektrickej siete (napr. očakávaný pokles zaťaženia transformátora kvôli poklesu jalového prúdu) sa kvalita siete výrazne zhorší kvôli nárastu harmonických prúdov.

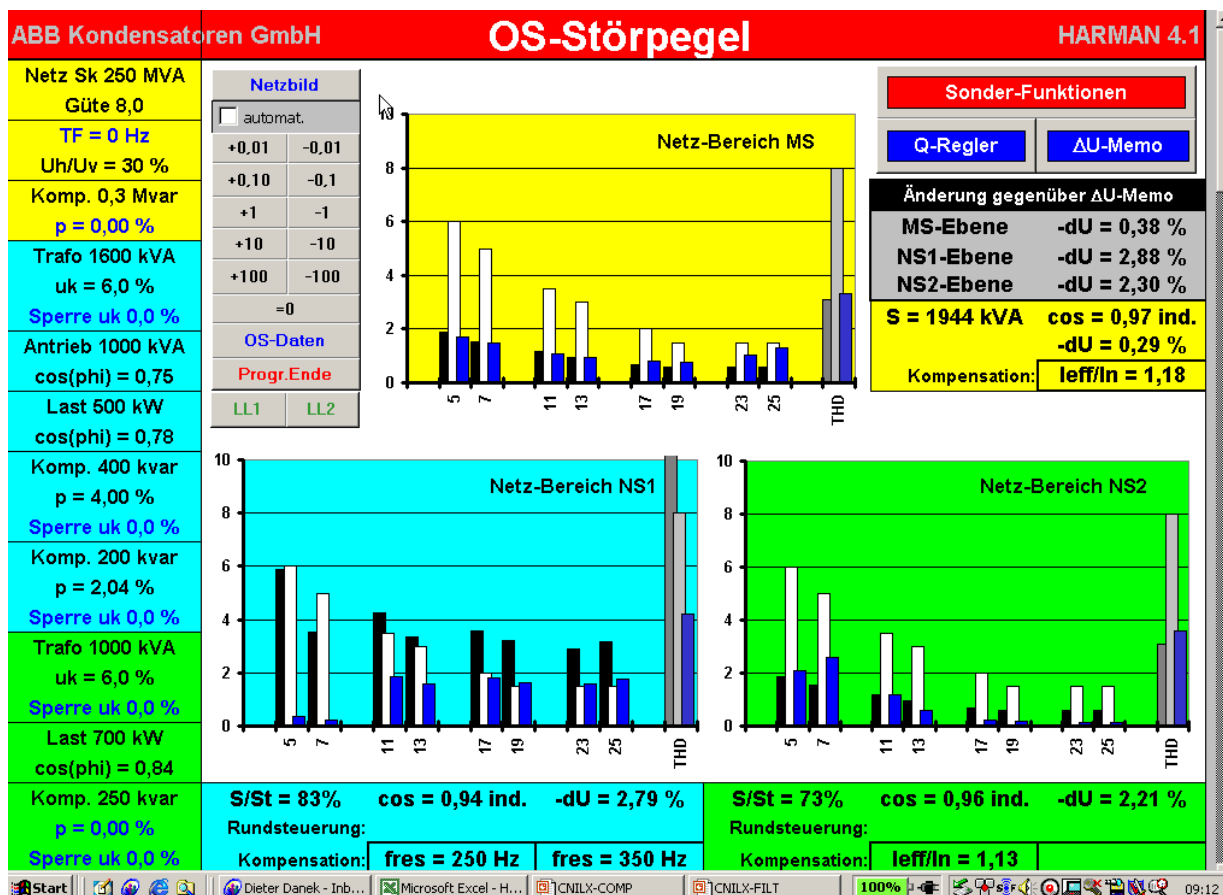
Je v praxi odskúšaným faktom, že inštaláciou vhodnej kompenzačnej jednotky sa problémy elektrickej siete väčšinou zredukujú na akceptovateľnú úroveň. Nie vždy bude elektrická sieť spĺňať normy, ale ak sa vylúči pripájanie citlivých spotrebičov do znečistenej siete, tak je takýto stav väčšinou dlhodobo vyhovujúci.

Jednoznačným odporúčaním je inštalovať kompenzačné jednotky ako chránené, so správnym typom tlmiviek. Nie je všeobecným všeliakom používať tlmivky 7%. Pre siete, kde je vysoký podiel jednofázových spotrebičov s polovodičovými prvkami (napr. spínané zdroje pre výpočtovú techniku), takáto, aj keď chránená kompenzačná jednotka (7%), kvalitu siete výrazne zníži. V ponuke firiem, ktoré sa kompenzácií jalovej energie venujú je vždy na výber celé spektrum ochranných tlmiviek, ktoré sú vhodné pre jednotlivé typy elektrických sietí.

Pri inštalácii nevhodnej kompenzačnej jednotky sa dajú okrem jej skrátenej životnosti očakávať problémy s rezonanciami – každá kompenzačná jednotka (kapacita) tvorí s elektrickou sieťou rezonančný obvod, ktorý má samozrejme určitú rezonančnú frekvenciu.

Keď vylúčime problémy s vyššími harmonickými prúdmi a napätiami spôsobenými nevhodnou kompenzačnou jednotkou (teda rezonancie), resp. vylúčime možnosti

eliminácie zmenou zapojenia na samostatný transformátor, tak problém s elektrickou sieťou je riešiteľný buď konvenčnými metódami – na mieru „ušíťmi“ jednoduchými zariadeniami, ktoré ale vyžadujú dokonalú znalosť siete a precízne projektovanie (napr. pomocou špeciálnych simulačných pomôcok ako je napr. na obrázku č. 3) – pasívne filtre, alebo je možnosť použiť všeobecne použiteľné elektronické zariadenia, ktoré sú však finančne nákladnejšie – aktívne filtre.



Obr. 3

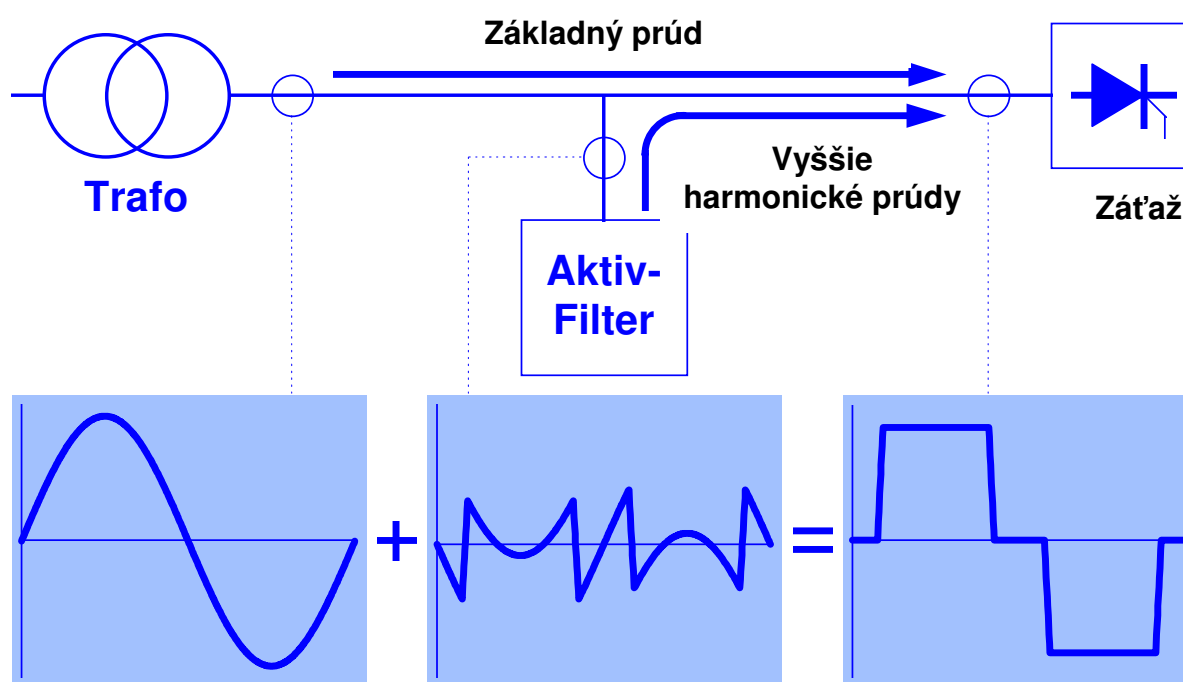
Hneď na úvod treba upozorniť, že tlmivky v chránenej kompenzačnej jednotke nie sú inštalované kvôli filtrovaniu vyšších harmonických prúdov z elektrickej siete, ale na ochranu kompenzačných kondenzátorov proti účinkom vyšších harmonických.

Ako už bolo spomenuté, filtračné zariadenia, ktoré dokážu zo siete filtrovať jednotlivé harmonické prúdy sa podľa princípu svojej činnosti delia na 2 základné skupiny:

1. Pasívne filtre
2. Aktívne filtre.

Činnosť oboch zariadení je založená na inom princípe a každé zariadenie je vhodné do inej aplikácie. Kým pasívny filter je väčšinou jednocelové, na mieru vyrobené zariadenie, aktívny filter je väčšinou všeobecne použiteľné zariadenie a pri dodržaní niekoľkých zásad (napr. rýchlosti zmien harmonických, harmonické nesmú mať pôvod z inej siete – z primárnej strany transformátora) môže byť univerzálnym všeliakom pri riešení problému s harmonickými prúdmi. Je fakt, že zákazník nie je vždy za takýto všeliak ochotný zaplatiť, takže aj aktívny filter sa navrhuje na mieru, presne na riešenie problému elektrickej siete.

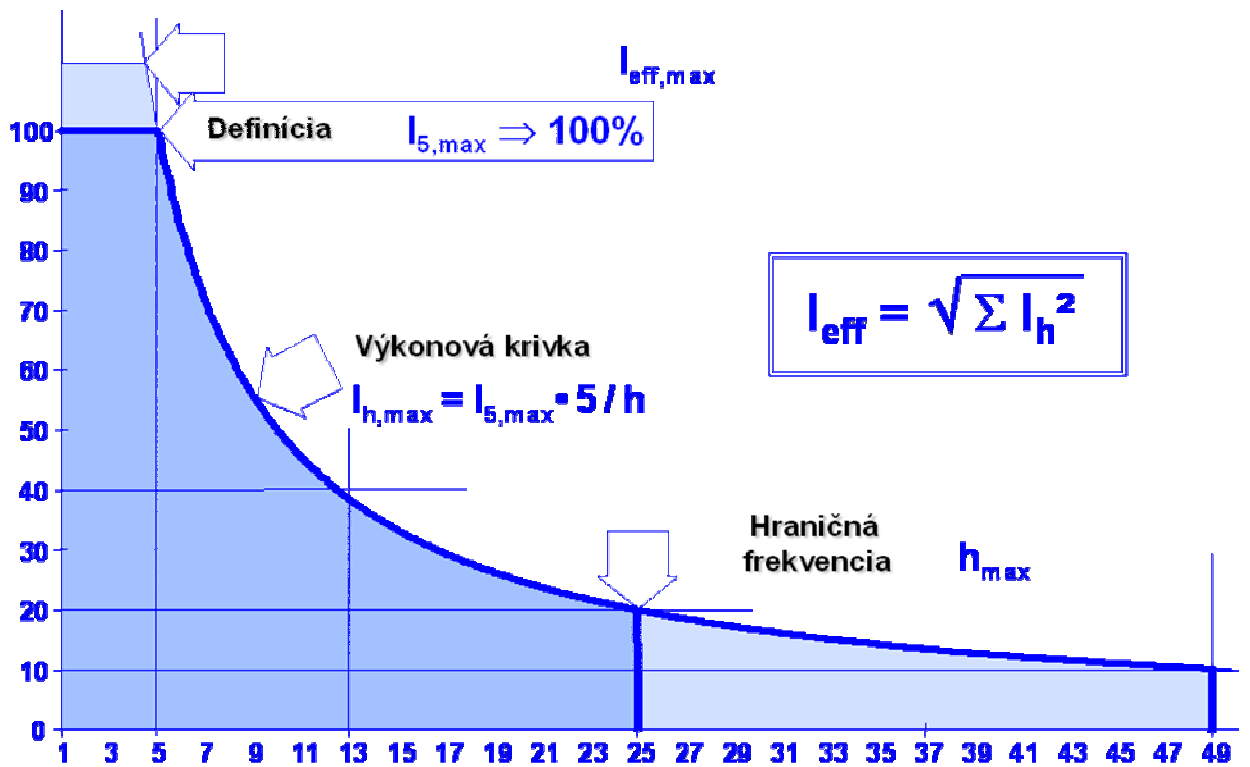
Aktívny filter je komplikované elektronické zariadenie, ktorého výkonovou jednotkou je frekvenčný menič, ktorý do siete generuje vyššie harmonické prúdy v protifáze proti tým, ktoré analyzuje zo siete. Výsledkom je, že deformovaný priebeh prúdu bude vyhladený (obrázok č. 4).



Obr. 4

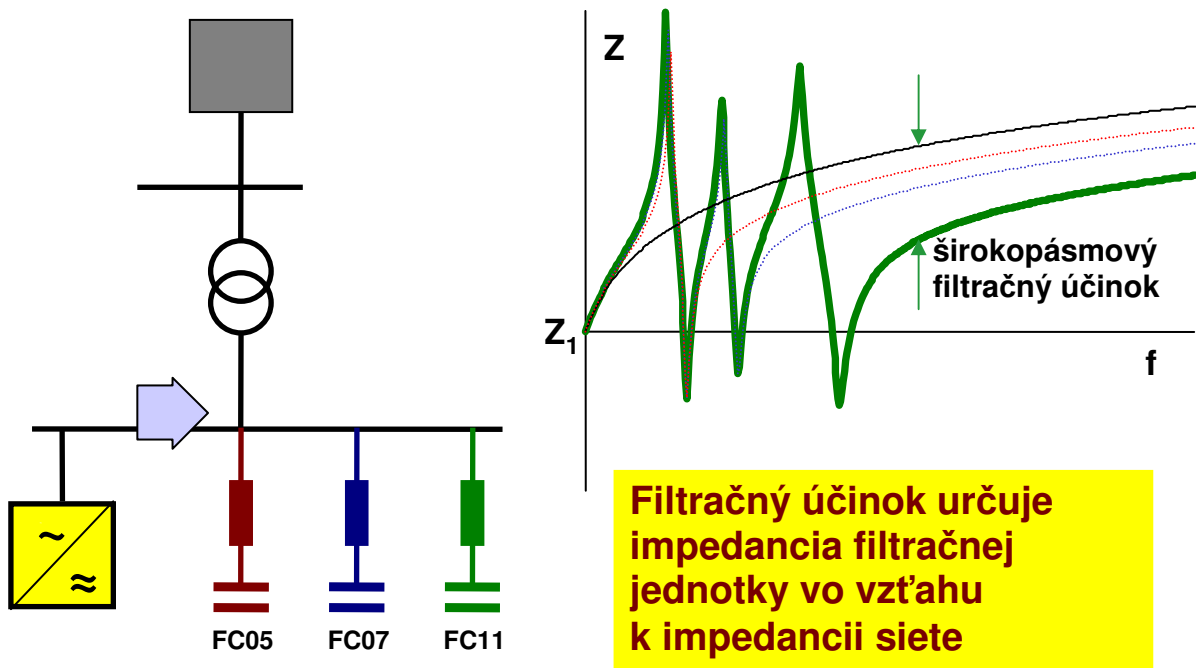
Aktívny filter je pripojený k sieti paralelne, nie je ho preto možné preťažiť. Aktívny filter tiež ponúka možnosť kompenzácie jalového výkonu a veľmi zaujímavú vlastnosť, ktorou je vyvažovanie výkonu v jednotlivých fázových vodičoch. Inštalácia aktívneho filtra nevyžaduje detailnú analýzu elektrickej siete, regulácia inštalovaná vo filtri umožňuje detailné nastavenie všetkých potrebných parametrov, rovnako tiež požadované úrovne harmonických prúdov. Parametre aktívneho filtra sú zrejmé z obrázka 5.





Obr. 5.

Pasívny filter pozostáva z jedného, alebo viacerých filtračných stupňov – kondenzátoru a filtračnej tlmivky, ktoré sú zapojené do série. Každý filtračný stupeň predstavuje pre konkrétnu frekvenciu minimálnu impedanciu, a tým zabezpečuje „odsávanie“ konkrétneho harmonického prúdu zo siete. Schematický náčrt 3-stupňového filtra je na obrázku č. 6.



Obr. 6

Pasívny filter je vždy navrhnutý pre konkrétnu aplikáciu a konkrétnu elektrickú sieť s konkrétnymi spotrebičmi. Z princípu filtra je zrejmé, že ho je možné pomerne jednoducho preťažiť, či už inštaláciou dodatočného spotrebiča, alebo ak sa na sieti objaví neočakávaný harmonický prúd, napr. zo strany dodávateľa elektrickej energie.

Pasívny filter má vždy inštalovaný aj určitý fixný kompenzačný výkon, čo treba uvážiť pri jeho aplikácii, aby nedošlo k prekompenzovaniu elektrickej siete. Pasívny filter neobsahuje štandardne žiadnu reguláciu ani žiadne meracie zariadenie.

Jednoznačnou výhodou pasívnych filtrov je pomer cena/výkon. Ak aplikácia vyžaduje len filtrovanie len „nižších“ harmonických, napr. 5-7-11-13, tak pasívnym filtrom sa dá pri relatívnej nízkej cene ponúknuť dostatočný výkon (pre zjednodušenie – napr. cena ¼ aktívneho filtra pri 2 násobnom výkone).

Pasívne filtre však majú niekoľko zjavných vlastností, ktoré treba zvážiť pri ich návrhu a inštalácii:

- Pasívny filter je nízka impedancia pre harmonické prúdy – preto hrozí preťaženie
- Filtrovanie závisí na parametroch siete – pre návrh sa vyžaduje detailná analýza
- Je náročné ich rozširovať
- Nebezpečenstvo rezonancie
- Je nevyhnutných viac fyzických stupňov pre filtrovanie viacerých harmonických
- Nároky na priestor

- Nevyvažuje sieť
- Vždy ponúkajú kapacitný (jalový) výkon
  - AC meniče nepotrebujú kompenzáciu
  - generátory nemôžu pracovať s kapacitným PF

Na riešenie komplikovaných problémov s vyššími harmonickými prúdmi a napätiami sa tiež využívajú rôzne špeciálne filtre – na vyrovnávanie komutačných poklesov napätia, filtrovanie HDO signálu, širokopásmové filtre...

Všeobecnou zásadou by pred inštaláciou zariadení malo byť vždy sa informovať o ich vplyve na elektrickú sieť. Vždy by mali byť preferované zariadenia, ktorých negatívny vplyv je najmenší, aj keď sa dá očakávať, že ich cena je vyššia. Rovnako by sa nemala podceňovať analýza elektrickej siete. Tá dokáže často upozorniť aj na blížiaci sa problém, a tým zabrániť nežiadúcemu poškodeniu zariadení alebo ich výpadkom.

[www.power-grid.eu](http://www.power-grid.eu)