

## Vyššie harmonické v elektrických sieťach, problémy, ktoré spôsobujú a možnosti ich eliminácie

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

Čo sa deje s našou elektrickou sieťou? V časoch technického pokroku by nás už nemalo nič prekvapiť. Prečo teda musí kvalita elektrickej siete zostať zachovaná? Prečo rozsiahle používanie elektronických zariadení, či už v priemysle alebo v domácnostiach, nesmie znižovať kvalitu elektrickej siete?

Zo všetkých noriem, doporučení a štandardov platných v krajinách EU, ale aj na celom svete je zrejmé, že skutočne použiteľná je iba elektrická energia s dostatočnou kvalitou.

Vo všeobecnosti sa kvalita elektrickej siete posudzuje podľa kvality elektrického napätia. V zmysle čo najefektívnejšieho využívania elektrickej energie je možné zhrnúť požiadavky na elektrické napätie do niekoľkých bodov:

- Konštantná frekvencia
- Sínusový priebeh
- Konštantná efektívna hodnota
- Symetria v troch fázach
- Žiadne výpadky
- Vysoká spoľahlivosť



● Hviezdoslavova 145/21 ● 017 01 Považská Bystrica ● Slovakia

Európska norma EN50160 popisuje vlastnosti elektrického napätia v sieťach nízkeho a vysokého napätia. Z vlastností platných pre nízke napätie môžeme vybrať najdôležitejšie:

- Frekvencia siete (priemerná hodnota meraná počas 10s):
  - 50Hz +/-1% počas 95% jedného týždňa
  - 50Hz + 4% / -6% počas 100% jedného týždňa
- Výška napätia v trojvodičovej sústave  $U_n=400V$  medzi fázovými vodičmi, v štvorvodičovej sústave  $U_n=230V$  medzi fázovými vodičmi a neutrálnym vodičom
- Pomalé zmeny napätia - počas 95% času 10 minútového intervalu  $U=U_n \pm 10\%$
- Rýchle zmeny napätia –  $\Delta u$  od 5 do 10% niekoľkokrát krátkodobo počas dňa (ak je zmena viac ako -10%, jedná sa o “pokles napätia“)
- Flicker počas 95% jedného týždňa  $P_{lt}<1$
- Poklesy napätia  $\Delta u >40\%$  pre  $t<1s$ , 10- až 1000-krát cez rok, niekedy môžu byť aj dlhšie a častejšie
- Harmonické napätia v zmysle tejto normy sú 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 tohoto intervalu  $< 8\%$
- Interharmonické napätia (neceločíselné násobky základnej harmonickej) nie sú v tejto norme špecifikované
- Krátkodobé prerušenia - 70% všetkých prerušení musí byť menej ako 1 s, pričom celkový počet prerušení je od 10 do 500 za rok a maximálna dĺžka prerušenia môže byť 3 minúty
- Ak je prerušenie dlhšie ako 3 minúty, jedná sa o dlhodobé prerušenie – toto sa môže vyskytovať 10- (štatisticky odsledovaná hodnota) až 50-krát za rok
- Prechodové javy musia byť menej ako 6kV s nárastom počas mikrosekúnd
- Krátkodobé prepätie základnej harmonickej musí byť menej ako 1.5kV

Power Grid, s. r. o.  
Hviezdoslavova 145/21  
017 01 Považská Bystrica  
Slovakia  
Tel./Fax.: +421 42 4322018

IČO: 36351334  
DIČ: 2022128592  
IČ DPH: SK2022128592  
office@power-grid.eu  
[www.power-grid.eu](http://www.power-grid.eu)

Tatra Banka  
Číslo účtu: 2622784945/1100  
IBAN: SK87 1100 0000 0026 2278 4945  
SWIFT: TATRSKBX

Uvedená norma je všeobecne platná – rovnako platí pre elektrické siete v európskych priemyselných oblastiach, ako aj pre elektrickú sieť zásobujúcu dve rodiny na samote v púšti – a z toho vyplývajú jej nedostatky. Pre väčšinu zákazníkov by elektrické napätie aj napriek tomu, že spĺňa vlastnosti podľa EN50160, bolo nepoužiteľné (napríklad frekvencia výpadkov a poklesov napätia). Preto existujú aj iné, prísnejšie štandardy, napr. EN61000-2-2 a 4, alebo „doporučenia“ ako napr. D-A-CH-CZ. Pre zákazníka je vždy dôležité, aby mal dohodnuté s dodávateľom elektrickej energie aj vlastnosti dodávanej energie podľa noriem, ktoré vyhovujú typu prevádzky. Norma tiež nehovorí o harmonických nad 50-tou harmonickou, aj keď ich prítomnosť v elektrickej sieti je niekedy viac než zrejmé (napríklad riadiace signály).

Normy, ktoré hovoria o kvalite elektrickej siete vo všeobecnosti, popisujú vlastnosti elektrickej siete, ktoré by mali zaručiť funkčnosť zariadení napájaných z tejto siete. Nehovorí sa v nich ale nič o tom, aké vlastnosti musí spĺňať zdroj elektrickej energie alebo spotrebič.

Problémy elektrickej siete sa dajú zjednodušene rozdeliť na 2 skupiny – na problémy, ktoré síce nespôsobujú problémy v prevádzke, ale sú penalizované zo strany dodávateľa – napr. jalová energia a na problémy, ktoré nie sú bežne penalizované, ale zákazníkovi spôsobujú rozsiahle škody, resp. znefunkčnenie zariadení.

Druhá skupina problémov sa javí ako vážnejšia, keďže ich neriešenie môže viesť až k nemožnosti prevádzkovať výrobné technológie.

Medzi problémy takéhoto významu možno zaradiť napr.:

- Flicker efekt
- Komutačné prekmity na napätí (comutation notches)
- Vysokofrekvenčné riadiace signály v elektrickej sieti
- Rezonancie
- Vyššie harmonické napätia a prúdy
- Nesymetrická sieť



● Hviezdoslavova 145/21 ● 017 01 Považská Bystrica ● Slovakia

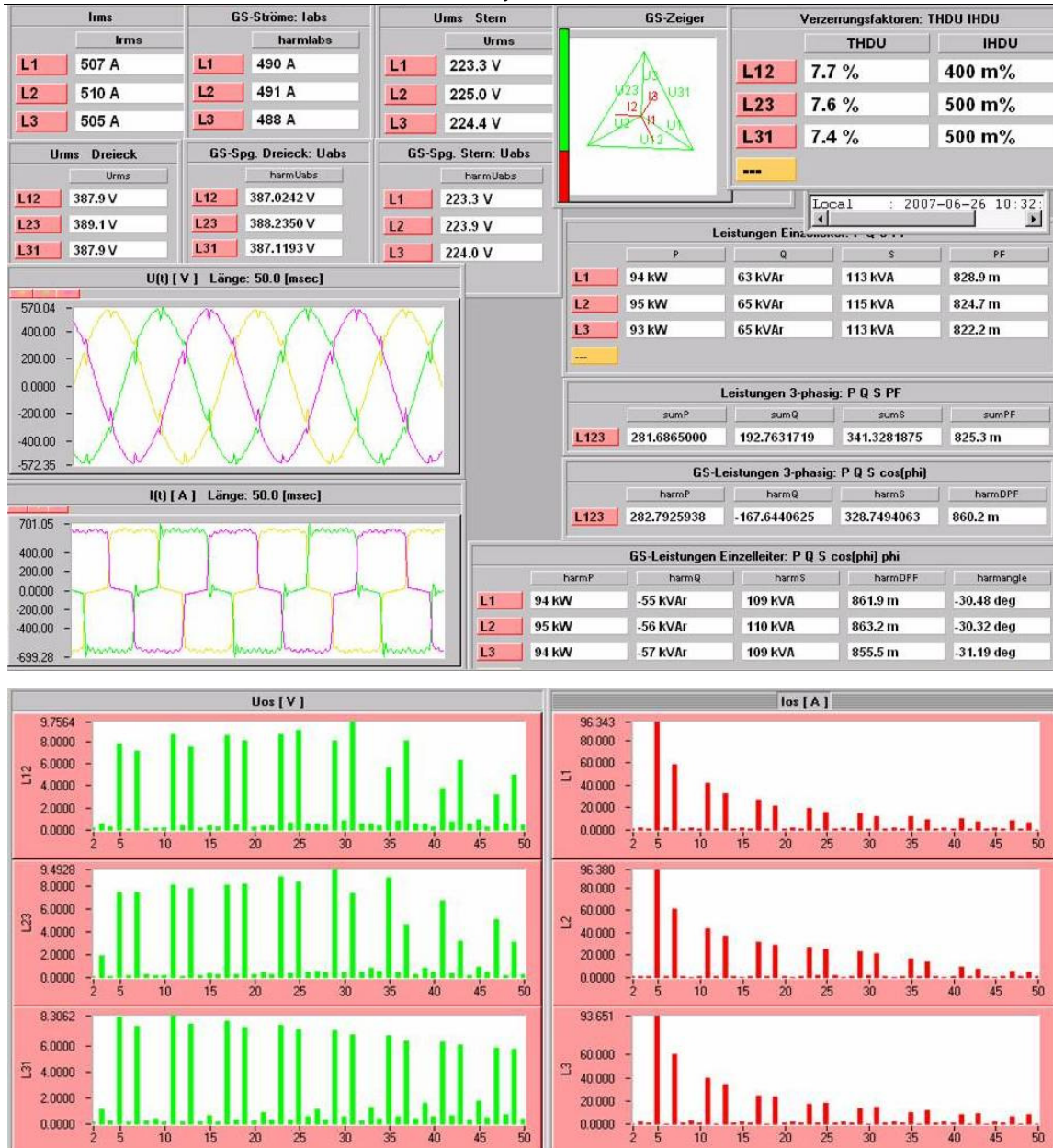
---

Treba však povedať, že všetky zmeny vlastností elektrickej siete zvyšujú, či už straty alebo spotrebu zariadení, a tým zvyšujú náklady na elektrickú energiu.

Ďalej treba problémy s elektrickou sieťou rozlišovať medzi tie, ktoré spôsobuje dodávateľ elektrickej energie a tie, ktoré si spôsobujú zákazníci. So skúseností však vyplýva, že problémy s kvalitou elektrickej siete (pokiaľ vylúčime výpadky resp. poklesy elektrického napätia) sú majoritne spôsobované so strany zákazníkov a nie dodávateľov.

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 a flicker. 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. 1 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.

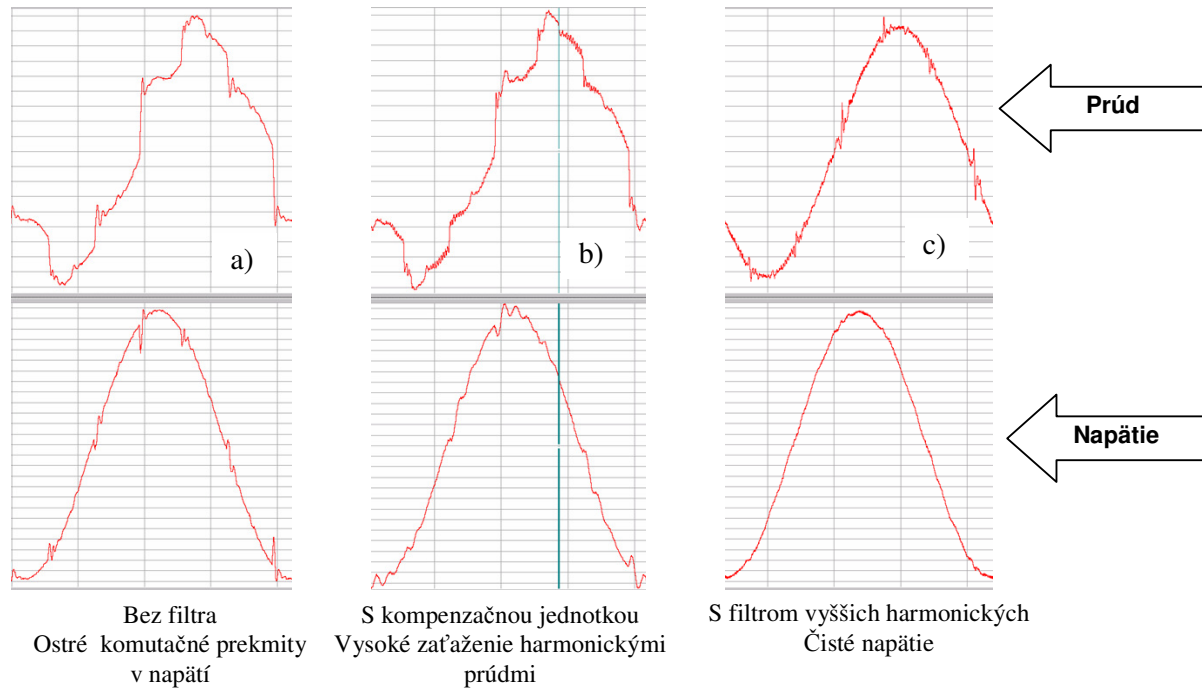
● Hviezdoslavova 145/21 ● 017 01 Považská Bystrica ● Slovakia



Obrázok č. 1

Zariadenia s nelineárnou VA charakteristikou spôsobujú, že priebeh prúdu v elektrickej sieti nemá ideálny tvar „sínusovky“, ale priebeh ako napríklad na obrázku č. 2a. Pri analýze spektra harmonických by sme zistili, že takéto zariadenie spôsobuje, že

prúd odoberaný zariadením nemá len zložku 1. harmonickej (50 Hz), ale aj celý súbor vyšších harmonických prúdov. Harmonické prúdy generujú pri prechode impedanciami harmonické napätia, čiže opäť pri analýze spektra harmonických napätí by sme zistili, že v sieti sa okrem 50 Hz nominálneho napätia vyskytujú aj rôzne hodnoty vyšších harmonických napätí.



Obrázok č. 2

Harmonické prúdy spôsobujú nárast špičkovej a rovnako efektívnej hodnoty prúdu. Tento nárast vzhľadom na nárast THDI je percentuálne vyjadrený v tabuľke 1.

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 zrejmy 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.

Zvýšenie efektívnej a rovnako aj špičkovej hodnoty spôsobuje zvýšenie strát spotrebičov, a tým nárast tepelného namáhania a zníženie ich životnosti. Rovnako často sledovaným javom, ktorým je sprevádzaný nárast harmonických prúdov, a tým spôsobený nárast špičkovej a efektívnej hodnoty prúdu, je vybavenie poistiek, resp. vypínanie ochrán.

Pri vyšších frekvenciách prúdu sa významne prejavuje tzv. „skinefekt“ - to znamená vytlačanie prúdu na povrch vodiča. Vplyvom tohto efektu sa znižuje aktívny prierez vodiča, a tým sa zvyšuje jeho odpor. S rastúcim odporom vodičov sa samozrejme zase zvyšuje ich oteplenie a teda straty.

V transformátoroch spôsobujú vyššie harmonické prúdy vyššie straty a teda nežiadúce vyššie zohrievanie. Zároveň harmonické prúdy generujú vírivé prúdy s rovnakým efektom. Zvýšenie teploty transformátora pritom negatívne ovplyvňuje jeho životnosť.

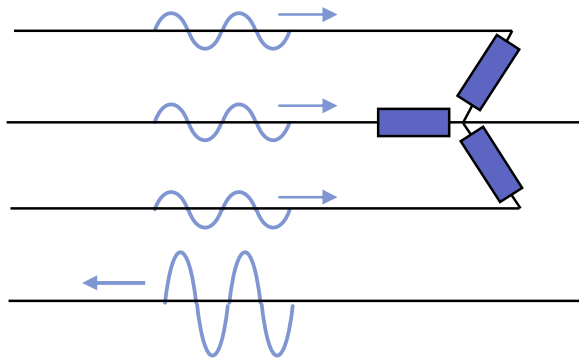
Veľmi citlivým a často podceňovaným komponentom sú kompenzačné kondenzátory. Ich zaťaženie harmonickými prúdmi môže spôsobiť ich deštrukciu, resp. výrazné skrátenie životnosti. Rovnako v prípade, že kompenzačný kondenzátor je použitý ako „nechránený“, čiže bez ochrannej filtračnej tlmivky, hrozí rezonancia medzi kondenzátorom a indukčnosťou celého systému (ako napr. obrázok č. 2b). 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.

Harmonické napätia v sieti predstavujú nebezpečenstvo pre moderné elektronické zariadenia, riadiace systémy, ale tiež napr. motory. Harmonické napätie je prítomné v celom elektrickom rozvode, nie len v mieste vzniku. Harmonické napätie je možné identifikovať na svorkách každého zariadenia pripojeného v sieti. Na úroveň harmonických

napätí sa vzťahujú aj v normách uvádzané limity a úroveň harmonických napätí, resp. THDU je kľúčový parameter, ktorý sa dá použiť pri posudzovaní kvality alebo nekvality elektrickej siete. Dôležité je si uvedomiť, že aj malý harmonický prúd môže spôsobiť výrazný nárast harmonického napätia kvôli rezonančným javom.

Je veľmi ťažké nájsť moderné elektronické zariadenie, ktoré nespôsobuje nárast harmonických prúdov (a tým vyvolaný nárast harmonických napätí) v elektrických sieťach.

V moderných zariadeniach sú v súčasnosti nasadzované najmä spínané zdroje jednosmerného napätia (bez transformátora), ktoré generujú predovšetkým tretiu harmonickú (prúd 150 Hz). V prípade tretej harmonickej (resp. nepárneho násobku tretej harmonickej) vzniká v trojfázovej štvorvodičovej sústave problém s preťažením neutrálneho vodiča. Za bežných okolností (pri vyváženej záťaži) sú fázové napätia posunuté o  $120^\circ$ , čiže neutrálnym vodičom netečie prúd. Pri tretej harmonickej (a jej násobkoch) vďaka tomu, že sú vo fáze dochádza k algebrickému súčtu hodnôt, a tým riziku preťaženia neutrálneho vodiča (obrázok 3). Z meraní je zrejmé, že v kancelárskych budovách môže tečť neutrálnym vodičom až 200% prúdu fázového vodiča (a to aj pri správne vyváženej sieti). Hrozí teda reálne riziko preťaženia neutrálneho vodiča, a tým následná tepelná deštrukcia izolácie fázových vodičov.



Obrázok č. 3

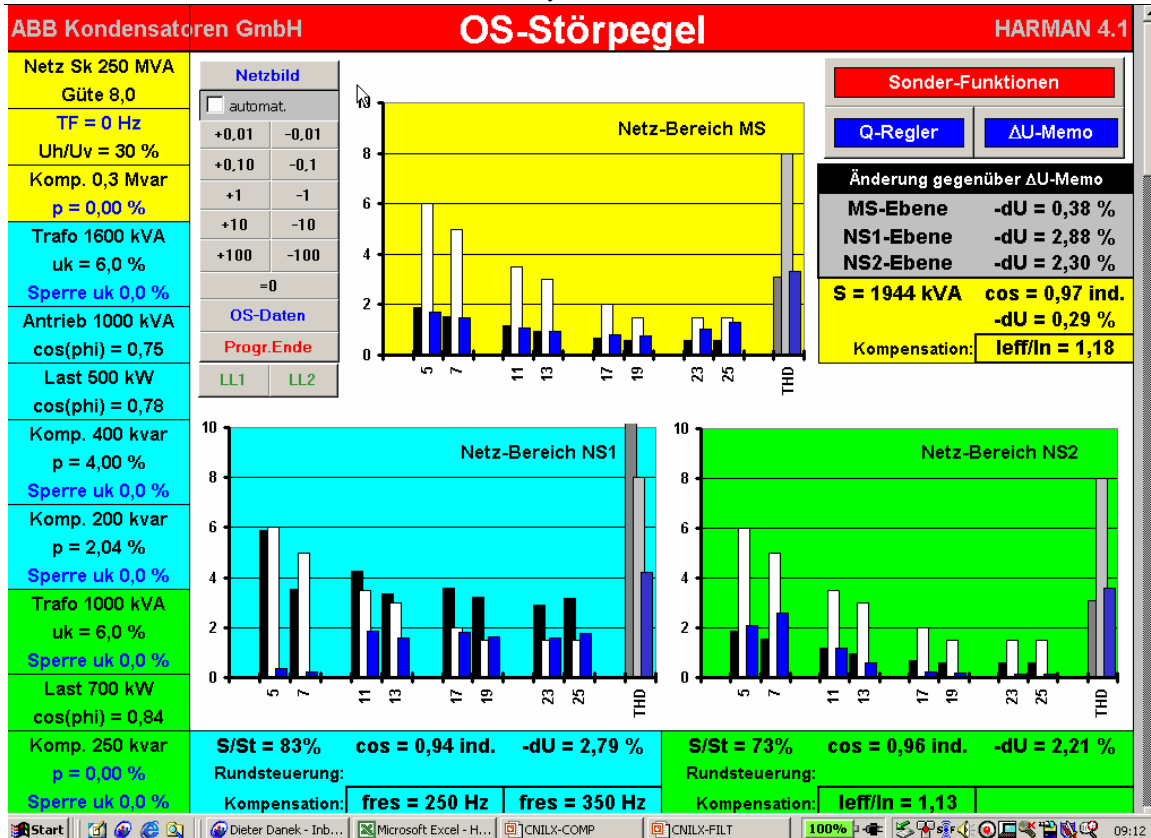


Je dôležité si uvedomiť, že jedno zariadenie problém nespôsobí, no niekoľko stoviek (napríklad počítačov) však už problém predstavovať môže.

Popri zariadeniach, ktoré sú zjavným zdrojom vyšších harmonických, ako napr. spomínané počítače, treba uvažovať aj napríklad bežne používané úsporné žiarivky s elektronickým predradníkom. Pri týchto zariadeniach je často napájací vodič viac zaťažený prúdom vyšších harmonických ako prúdom 1. harmonickej. Opäť platí, že jedna žiarivka problém nespôsobí, ak je však nimi vybavená celá budova, tak problémy sa očakávať dajú.

V priemyselných prevádzkach sú zdrojom vyšších harmonických jedno alebo trojfázové usmerňovače (či už diódové alebo tyristorové, 6 alebo 12 pulzné), frekvenčné meniče, nabíjačky... Základom týchto zariadení sú nelineárne spínacie prvky (diódy, tyristory, IGBT tranzistory), ktoré generujú vyššie harmonické prúdy. Pri inštalácii spomínaných zariadení neplatí, že  $1+1=2$ , keďže harmonické prúdy sa môžu nachádzať aj v protifáze, a tak sa v ideálnom prípade navzájom zo siete odfiltrujú. Častejšie však dochádza práve k amplifikácií negatívnych vplyvov a teda reálny stav elektrickej siete je často horší ako bol očakávaný.

Keď vylúčime problémy s vyššími harmonickými prúdmi a napätiami spôsobenými nevhodnou kompenzačnou jednotkou (teda rezonancie), resp. vylúčime možnosti eliminácie zmenou zapojenia a konštrukcie transformátorov (čo väčšinou nie je možné), 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. 4) – pasívne filtre, alebo je možnosť použiť všeobecne použiteľné elektronické zariadenia, ktoré sú však finančne nákladnejšie – aktívne filtre.



Obrázok č. 4

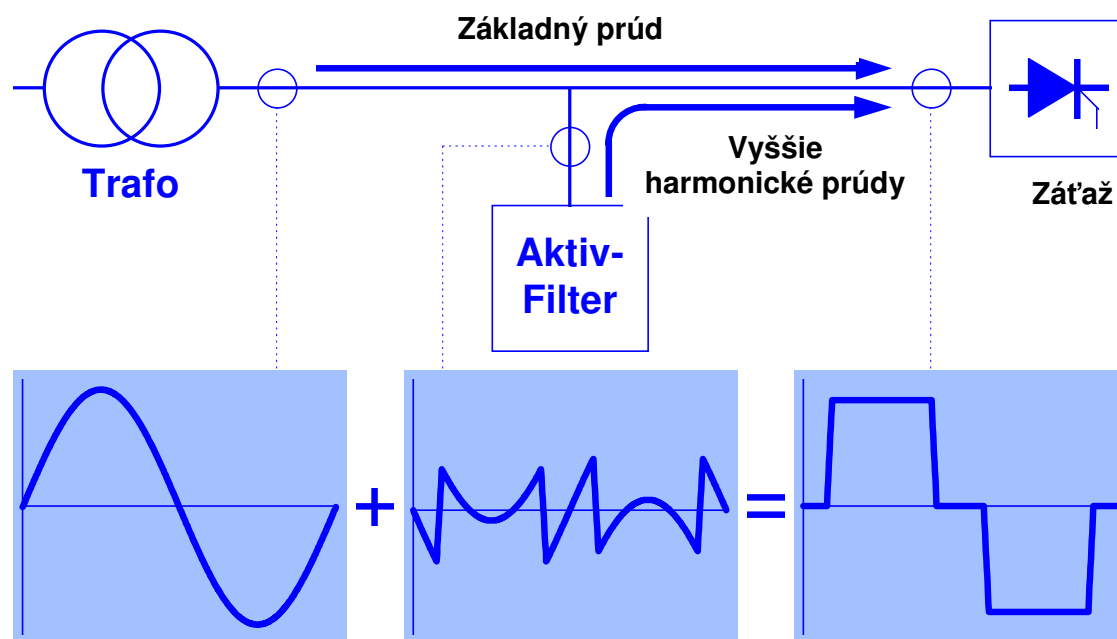
Hneď na úvod treba upozorniť, že tlmivky v chránenej kompenzačnej jednotke nie sú inštalované kvôli filtrovaniu vyšších harmonických prúdov z elektrickej siete, ale na ochranu kompenzačných kondenzátorov proti účinkom vyšších harmonických.

Najlepšou ochranou pred vyššími harmonickými prúdmi, resp. napätiami je zabrániť ich generovaniu. Pri malých zdrojoch ako je napr. výpočtová technika to nie je celkom možné, ale pri výkonných zariadeniach ako sú napr. frekvenčné meniče je vždy možnosť inštalovať zariadenie s filtrom, ktorý zabraňuje šíreniu sa vyšších harmonických do siete. Rovnako sú dostupné zariadenia s riadenými vstupnými obvodmi, ktoré minimalizujú generáciu vyšších harmonických. Výrobca zariadenia dokáže vždy najlepšie designovať jednoúčelové filtračné zariadenie, čím zabezpečí maximálny výkon pri minimálnych

nákladoch. Pri jednoduchších zariadeniach je často postačujúca inštalácia vhodnej filtračnej tlmivky v sérii so zariadením.

Pre minimalizáciu vplyvu vyšších harmonických je tiež podstatná „tvrdosť“ napájacieho zdroja – vyšší skratový prúd totiž znamená menšiu impedanciu a tým generované nižšie harmonické napätie.

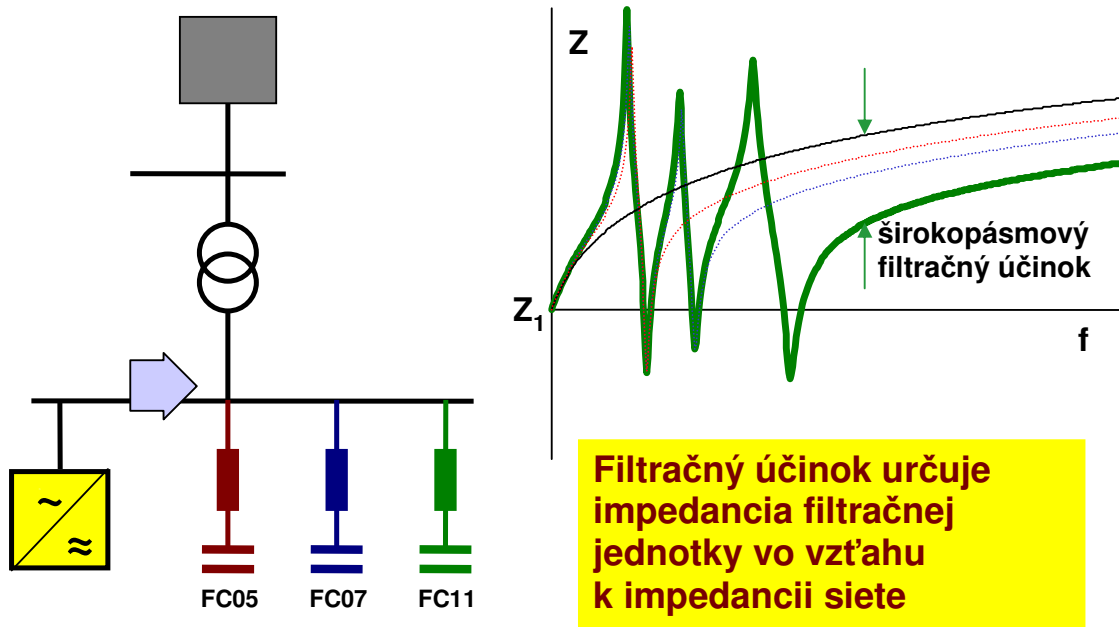
Aktívny filter je komplikované elektronické zariadenie, ktorého výkonovou jednotkou je frekvenčný menič, ktorý do siete generuje vyššie harmonické prúdy v protifáze proti tým, ktoré analyzuje zo siete. Výsledkom je, že deformovaný priebeh prúdu bude vyhladený (obrázok č. 5), resp. obrázok č. 2c.



Obrázok č. 5

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.

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.



Obrázok č. 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.

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...



● Hviezdoslavova 145/21 ● 017 01 Považská Bystrica ● Slovakia

---

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 blížiace sa problémy, a tým zabrániť nežiadúcemu poškodeniu zariadení alebo ich výpadkom.

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

---

Power Grid, s. r. o.  
Hviezdoslavova 145/21  
017 01 Považská Bystrica  
Slovakia  
Tel./Fax.: +421 42 4322018

IČO: 36351334  
DIČ: 2022128592  
IČ DPH: SK2022128592  
[office@power-grid.eu](mailto:office@power-grid.eu)  
[www.power-grid.eu](http://www.power-grid.eu)

Tatra Banka  
Číslo účtu: 2622784945/1100  
IBAN: SK87 1100 0000 0026 2278 4945  
SWIFT: TATRSKBX