Kvalita elektrické energie - průvodce

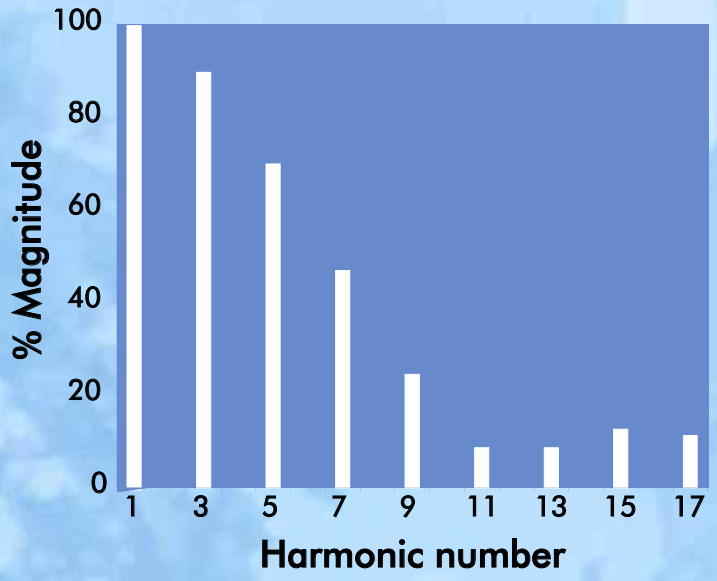
Education and Culture

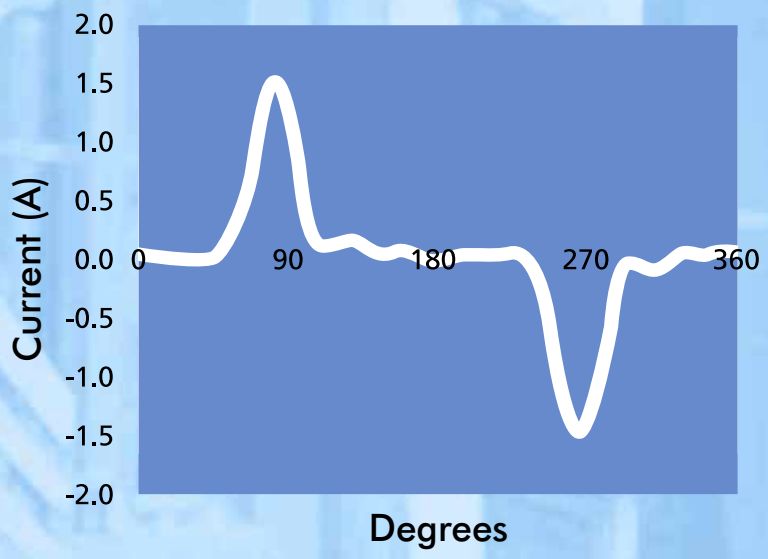
Leonardo da Vinci

Harmonické

Příčiny a účinky

3.1





HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

European COPPER Institute

Harmonické

Harmonické

Příčiny a účinky

David Chapman, Copper Development Association, Velká Británie

Překlad: Josef Gavlas, Miloslav Kužela, Pavel Santarius, FEI Technická univerzita Ostrava

Hungarian Cooper Promotion Centre (HCPC)

HCPC je nezisková organizace financovaná producenty mědi a výrobci zpracovávajícími měď. Jejím cílem je podporovat používání mědi a měděných slitin a napomáhat jejich správné a účinné aplikaci. Služby HCPC, mezi něž patří i poskytování informací a technického poradenství, jsou dostupné zájemcům o využití mědi ve všech oborech. Sdružení rovněž slouží jako prostředník mezi výzkumnými organizacemi a průmyslovými uživateli a udržuje těsné styky s obdobnými středisky mědi ve světě.

Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB Technická univerzita Ostrava (FEI - TUO)

Fakulta elektrotechniky a informatiky zahájila svou činnost na VŠB Technické univerzitě v Ostravě od 1. ledna 1991. Fakulta zajišťuje všechny formy vysokoškolského studia (tj. bakalářské, magisterské a doktorské) ve studijním programu Elektrotechnika a informatika s ucelenou strukturou elektrotechnických oborů a inženýrské informatiky. Nedílnou součástí činnosti pedagogů na fakultě je i vědecko-výzkumná činnost, kde jedním z nosných programů je kvalita elektrické energie s hlavním zaměřením na problematiku monitorování parametrů kvality a na problematiku harmonických v elektrických sítích.

European Copper Institute (ECI)

European Copper Institute je organizací založenou podporujícími členy ICA (International Copper Association) a IWCC (International Wrought Copper Council). ECI zastupuje největší světové producenty mědi a přední evropské výrobce při propagaci mědi v Evropě. ECI, který byl založen v roce 1996, se opírá o síť deseti národních organizací (Copper Development Associations - 'CDAs') v Beneluxu, Francii, Německu, Řecku, Maďarsku, Itálii, Polsku, Skandinávii, Španělsku a Spojeném království. Navazuje na činnost sdružení Copper Products Development Association založeného v roce 1959 a INCRA (International Copper Research Association) založeného v roce 1961.

Upozornění

Obsah tohoto materiálu nemusí nutně vyjadřovat názor Evropského společenství a není pro něj ani závazný.
European Copper Institute a Hungarian Cooper Promotion Centre odmítají odpovědnost za jakékoliv přímé, nepřímé či vedlejší škody, které mohou být způsobeny nesprávným využitím informací v této publikaci.

Copyright© European Copper Institute a Copper Development Association.

Česká verze byla připravena ve spolupráci HCPC a Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB - Technické Univerzity Ostrava.

Reprodukce je možná za předpokladu, že materiál bude otištěn v nezkrácené podobě a s uvedením zdroje.

HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

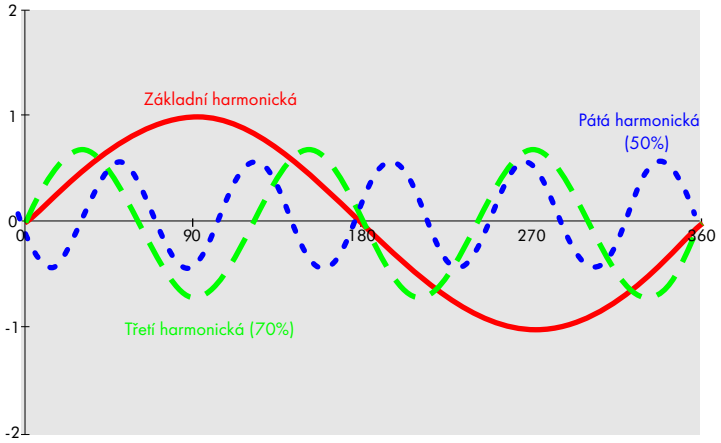
Hungarian Copper Promotion Centre
Képíró u. 9
H - 1053 Budapest
Maďarsko
Tel: 00 36 1 266 4810
Tel: 00 36 1 266 4804
Email: hcpc.bp@euroweb.hu

VŠB - TU Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky
17. listopadu 15
CZ 708 33 Ostrava-Poruba
Tel: +420 597324279
Tel: +420 596919597
Email: pavel.santarius@vsb.cz

European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium
Tel: 00 32 2 777 70 70
Tel: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org

Harmonické

Příčiny a účinky

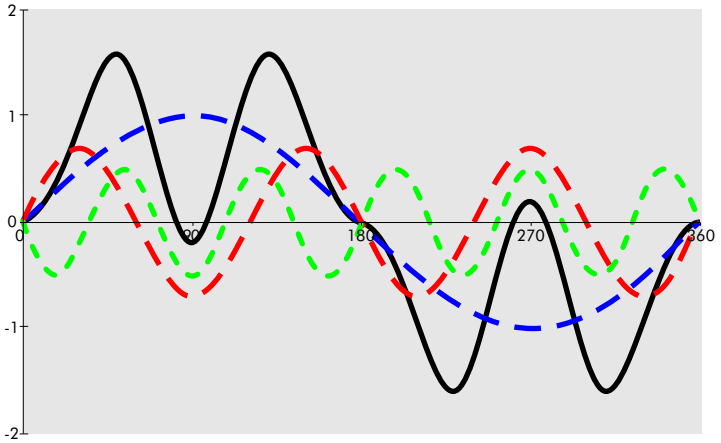


Obrázek 1 Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou

Tato část Průvodce se zabývá původem harmonických proudů a účinky, které harmonické vyvolají v elektrických systémech. Metody omezení harmonických jsou diskutovány v části 'Řešení problematiky harmonických'.

Harmonické frekvence jsou celé násobky základní harmonické napájecího napětí, tzn. při základní harmonické 50 Hz je třetí harmonická 150 Hz a pátá harmonická je 250 Hz. Obrázek 1 ukazuje sinusový průběh základní, třetí a páté harmonické.

Obrázek 2 ukazuje průběh základní harmonické s obsahem 70% třetí harmonické a 50% páté harmonické. Musíme zde poznamenat, že ve skutečnosti bude většina deformovaných průběhů proudu mnohem složitější,než je v tomto případě a bude obsahovat mnohem více harmonických se složitějším fázovým posuvem.



Obrázek 2 Deformovaný časový průběh proudu

Obrázek 2 ukazuje časový průběh, který není pouze sinusový, což znamená, že běžné měřící zařízení, jako je například multimetr měřící efektivní hodnoty, nebude měřit správně. Na obrázku je vidět, že takto deformovaný průběh proudu obsahuje šest průchodů nulou za periodu, namísto obvyklých dvou a tedy každé zařízení, které využívá průchod proudu nulou jako referenční nebude fungovat správně. Skutečnost, že takovýto průběh obsahuje i jiné harmonické, než pouze základní, musí být vždy brána v úvahu.

Pokud mluvíme o harmonických v elektroinstalacích, zajímá nás nejvíce právě proud, protože způsobuje vznik dalších harmonických proudů a je zdrojem většiny negativních vlivů na tuto síť. Bez znalosti spektra harmonických proudů nemůžeme provést žádné korektní závěry a vyhodnocení. Velmi často se pro charakterizování obsahu harmonických používá činitel harmonického zkreslení (THD). Pokud se harmonické šíří distribučním systémem, tzn. jednotlivé větve obvodů nejsou navrženy s ohledem na výskyt harmonických proudů, šíří se jako harmonická napětí. Je velmi důležité, že hodnoty napětí i proudu jsou měřitelné a že tyto zmíněné hodnoty jsou jednoznačně definovány jako napětí a proud. Obecně je činitel harmonického zkreslení proudu označován připojením písmene I, např. 35 % THDI, a činitel harmonického zkreslení napětí napětí označován připojením písmene U, např. 4 % THDU.

Harmonické proudy se v elektrických napájecích obvodech vyskytují již mnoho let. Na počátku byly generovány rtuťovými usměrňovači používanými v elektrických trakcích k přeměně střídavého proudu na proud stejnosměrný a pro řízení otáček motorů v průmyslu. V poslední době se stále zvyšují počty i druhy spotřebičů, které jsou zdroji harmonických. Můžeme předpokládat, že tento počet bude i nadále růst, a tak projektanti a autoři norem a předpisů musí s výskytem harmonických počítat a znát velmi dobře jejich negativní působení.

Tato kapitola dále popisuje jak a proč jsou harmonické generovány, jak působí harmonické na elektrické sytémy a zařízení a jak minimalizovat tyto efekty.

Druh spotřebičů generujících harmonické

Harmonické proudy jsou generovány všemi nelineárními spotřebiči. Nelineární spotřebiče jsou:

Jednofázové zátěže, např.

- Spínané napájecí zdroje (SMPS)
- Elektronické předřadníky kompaktních svítidel tzv. CFL
- Malé zdroje nepřerušitelného napájení (UPS)

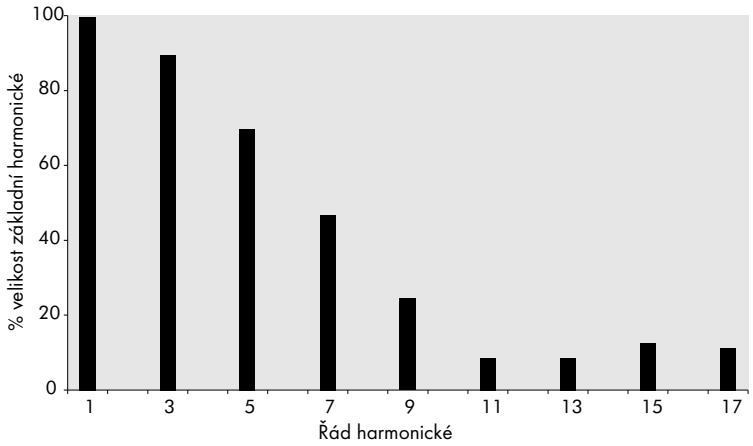
Trojfázové zátěže, např.

- Elektronické regulační pohony
- Velké UPS jednotky

Jednofázové zátěže

Spínané napájecí zdroje (SMPS)

Většina moderních elektronických jednotek používá spínané napájecí zdroje (SMPS). Tradiční redukční transformátory a usměrňovače jsou nahrazeny přímo řízeným usměrňovačem, který nabíjí kondenzátor a ten pak napájí stejnosměrným proudem zátěž. Výhoda pro výrobce zařízení je, že velikost, cena a váha jsou podstatně redukovány a napájecí jednotka může být vyrobena přesně dle požadovaného činitele tvaru. Nevýhoda pro každého je, že zátěž odebírá místo lineárního proudu pulsující proud, který obsahuje velké množství třetí a dalších harmonických vyšších řádů a má významný obsah vysokofrekvenční složky (viz. Obrázek 3). Jednoduchý filtr, který je umístěn v napájecí jednotce k vyzkratování vysokofrekfenčních složek, ale nemá žádný účinek na harmonické proudy, které tečou zpět do napájecího vedení. Podstata efektů těchto filtrů je diskutována v části 6 Průvodce.



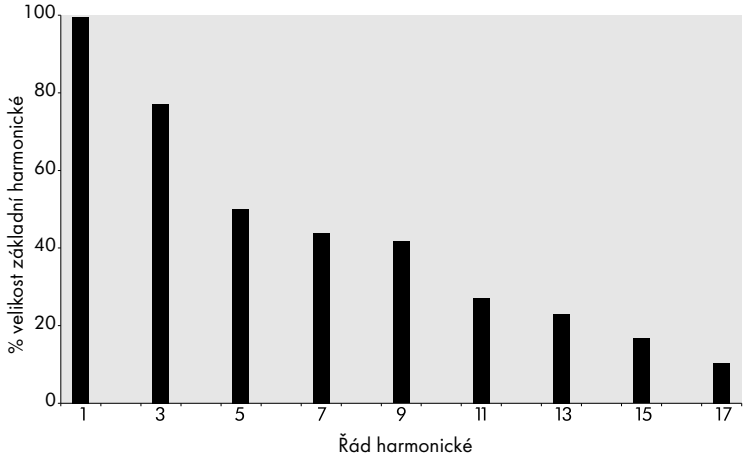
Obrázek 3 - Spektrum harmonických standartního PC

Jednofázová jednotka UPS ukazuje velmi podobnou charakteristiku jakou mají spínané napájecí zdroje (SMPS).

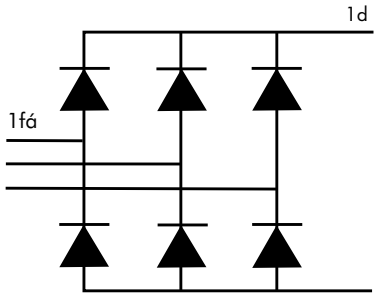
V poslední době se velké energetické jednotky realizují s takzvaným vstupem s kompenzovaným účiníkem. Cílem je udělat jednotku tak, aby měla charakter čistě odporové zátěže, takže odebíraný proud bude sinusový a ve fázi s napájecím napětím. Takováto vysoká úroveň nároků není jednoduše aplikovatelná pro finančně nenáročné jednotky, které jsou vyráběny pro většinu spotřebičů v komerčních a průmyslových instalacích. Uvidíme jaké problémy se ještě mohou objevit při stálé častějším používání těchto aplikací!

Elektronické předřadníky kompaktních svítidel

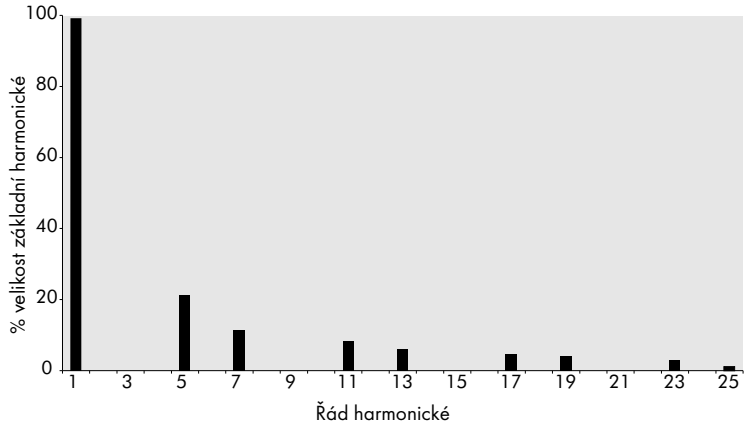
Elektronické předřadníky svítidel se v posledních letech staly velmi populárními, protože se díky nim vylepšila účinnost svítidel. Obecně lze konstatovat, že jsou pouze o něco málo účinnější než nejlepší elektromagnetické předřadníky a ve skutečnosti je nutné větší účinnost svítidel přičíst více na vrub tomu, že jsou napájeny vysokou frekvencí. Jejich hlavní výhodou je, že úroveň osvětlení může být zachována zároveň s prodloužením životnosti a to zásluhou regulace se zpětnou proudovou vazbou. Jejich největší nevýhodou je, že generují harmonické v odebíraném proudu. Typy s kompenzací účiníku jsou díky své



Obrázek 4 - Spektrum harmonických typického CFL



Obrázek 5 - Trojfázový, neboli šestipulsní můstek



Obrázek 6 - Spektrum harmonických typického šestipulsního můstku

vysoké ceně dostupné pouze pro výkonově větší svítidla. Malé jednotky jsou většinou bez kompenzace.

Kompaktní svítidla (CFL) se nyní prodávají jako náhrada za žárovky s wolframovým vláknem. Miniaturní elektronický předřadník je umístěn v patici svítidla, do které je zasazena zářivková trubice o průměru 8 mm. CFL svítidla o výkonu 11 wattů jsou prodávana jako náhrada za 60 wattovou žárovku a mají udávanou životnost 8 000 hodin. Spektrum harmonických typického kompaktního svítidla ukazuje Obrázek 4. Tato svítidla jsou hojně využívána pro nahrazení klasických žárovek v domácnostech a speciálně v hotelech, kde se následně mohou objevit vážné problémy s harmonickými.

Trojfázové zátěže

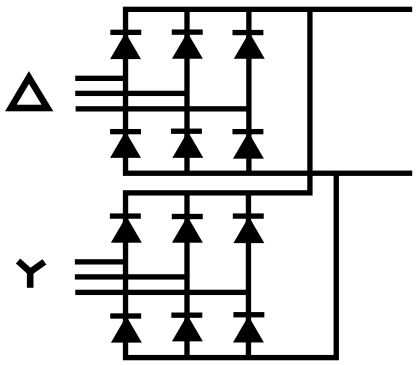
Elektronické regulátory otáček, UPS jednotky a usměrňovače jsou obecně založeny na principu trojfázového můstku, který je také známý jako tzv. šestipulsní můstek, protože se zde vyskytuje 6 pulsů za jednu periodu (jeden za půl periodu a fázi) na jeho stejnosměrném výstupu.

Šestipulsní můstek generuje harmonické v řádu 6n +/-1, tzn. v řádu o jeden nižší a o jeden vyšší než je šestinásobek základní harmonické. Velikost každé harmonické je teoreticky nepřímo úměrná řádu harmonické, takže může být 20 % páté harmonické a 9 % jedenácté harmonické, atd.

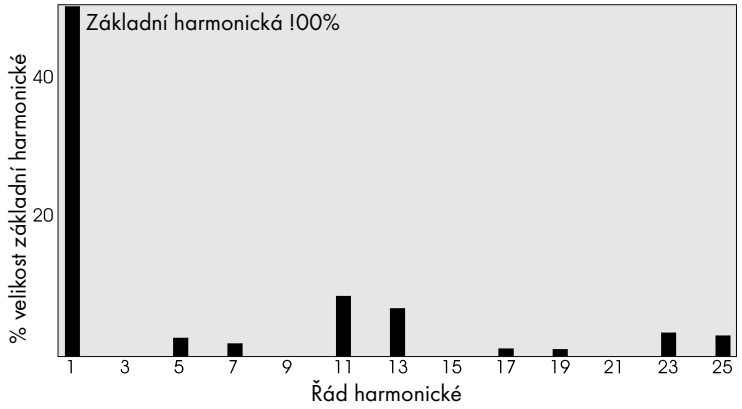
Typické spektrum šestipulsního můstku ukazuje Obrázek 6.

Velikost harmonických je významně redukována použitím 12-ti pulsního můstku. V podstatě se jedná o dva šestipulsní můstky napájené z transformátorového vinutí zapojeného hvězda/ trojúhelník s 30-ti stupňovým fázovým posunem mezi těmito vinutími.

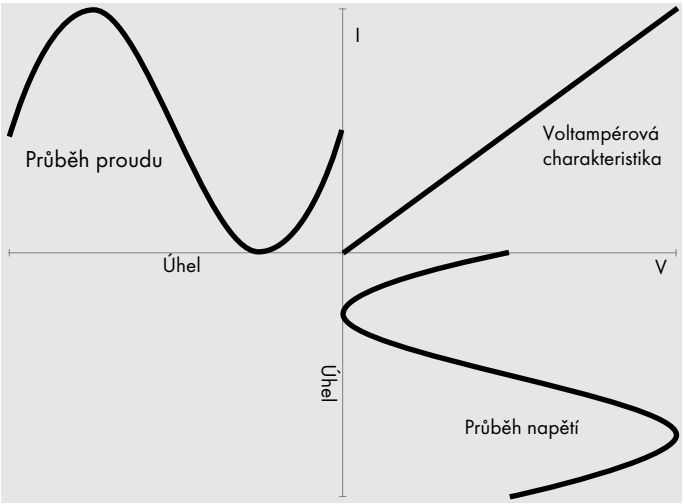
Teoreticky jsou u tohoto můstku harmonické řádu 6n odstraněny, ale v praxi hodnota jejich omezení závisí na „přizpůsobení“ střídače, které je často



Obrázek 7 - Dvanáctipulsní můstek



Obrázek 8 - Harmonické spektrum typického 12-ti pulsního můstku



Obrázek 9 - Časový průběh proudu lineární zátěží

s faktorem mezi 20 a 50. Harmonické řádu 12n zůstávají nezměněny. Při tomto zapojení není redukován jen celkový harmonický proud, ale zůstávají pouze harmonické proudy vyšších řádů, pro které je návrh filtru mnohem snadnější.

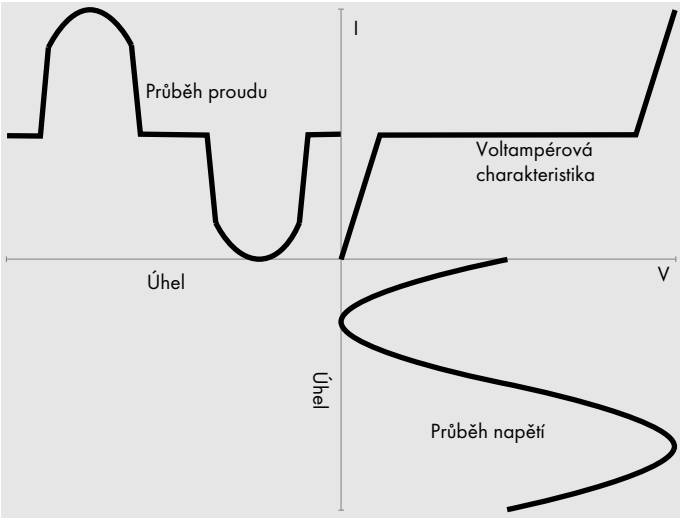
Výrobce často udělá určité kroky k redukování velikosti harmonických proudů, např. přidáním filtrů nebo seriových indukčností (cívek). V minulosti to vedlo některé výrobce k tomu, aby tvrdili, že jejich zařízení je vyhovující anglické normě „G5/3“. Vzhledem k tomu, že G5/3 je norma vztahující se k celé elektroinstalaci, nemůže nikdo tvrdit, že jeho zařízení splňuje tuto normu bez znalostí všech zařízení připojených k této elektroinstalaci.

Další zvýšení počtu pulsů na 24 dosáhneme použitím dvou paralelních 12-ti pulsních jednotek s fázovým posuvem 15 stupňů. To povede k redukování celkového harmonického proudu o cca 4,5%. U tohoto zařízení samozřejmě vzroste jeho cena, a proto je tento typ zařízení používán pouze při absolutní nezbytnosti redukovat limit harmonického zkreslení.

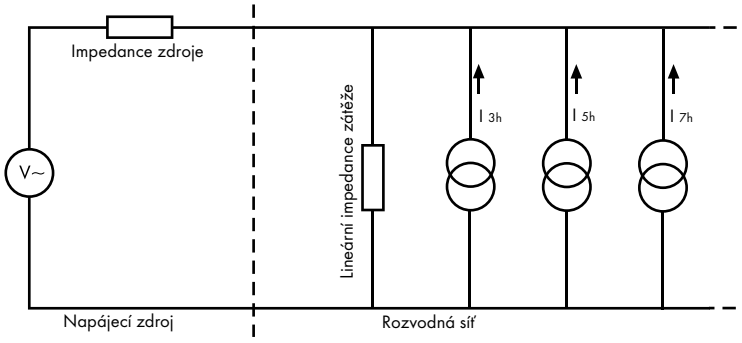
Teoretický základ jak jsou harmonické generovány

V ideálně „čistém“ elektrickém systému má proud i napětí tvar čisté sinusovky. V praxi jsou nesinusové proudy výsledkem průtoku proudu nelineární zátěží napájené sinusovým napětím. V jednoduchém obvodu, který obsahuje pouze lineární prvky odpor, indukčnost a kapacitu je proud, který jimi protéká úměrný napájecímu napětí (při konkrétní frekvenci), takže pokud napájecí napětí je sinusové bude protékat sinusový proud, tak jak ukazuje obrázek 9. Voltampérová charakteristika zátěže vyjadřuje vztah mezi napájecím napětím a proudem; jak ukazuje obrázek 9 pro lineární zátěž. Je třeba poznamenat, že pokud se v obvodu vyskytuje reaktanční prvek, bude mezi průběhem napětí a proudu fázový posun. Účiník je snížen, ale obvod je stále lineární.

Obrázek 10 ukazuje situaci, kdy zátěží je jednoduchý dvocestný usměrňovač s kondenzátorem tak, jak je tomu u typického spínaného zdroje. V tomto



Obrázek 10 - Časový průběh proudu nelineární zátěží



Obrázek 11 - Náhradní obvod nelineární zátěžě

případě protéká proud (je propuštěn) pouze tehdy, když napájecí napětí překročí napětí na kondenzátoru, tzn. blízko špičkové hodnoty sinusového napětí, tak jak ukazuje tvar voltampérové charakteristiky zátěže.

Obvykle je voltampérová charakteristika zátěže (a tedy i průběh proudu) pravděpodobně mnohem složitější než je ilustrováno na příkladu; může se zde objevit také asymetrie a hystereze, přičemž body zlomu a sklon se bude měnit v závislosti na zátěži.

Periodický průběh může být rozložen do sinusovky se základní frekvencí a několika sinusovek harmonických frekvencí. Zdeformovaný průběh proudu, jak ukazuje obrázek 10 může být tedy reprezentován základní frekvencí s obsahem druhé, třetí až třicáté harmonické. Pro symetrickou křivku, tzn. když kladná a záporná půlperioda má stejný tvar a velikost, jsou všechny sudé harmonické nulové. Sudé harmonické se vyskytují docela zřídka, ale v minulosti byly běžné, díky častému používání jednocestného usměrňovače.

Náhradní obvod nelineární zátěže ukazuje obrázek 11. Tento obvod může být namodelován lineární zátěží paralelně s několika proudovými zdroji, jeden zdroj pro každou harmonickou frekvenci.

Harmonické proudy generované zátěží přesněji přeměněny zátěží ze základní harmonické proudu musí protékat obvodem přes impedanci zdroje a přes všechny paralelní větve. Jako výsledek se objeví harmonické napětí na impedanci zdroje a tedy je přítomno v celé instalaci. Generátory harmonických jsou často znázorňovány jako generátory napětí; Pokud by to ovšem byla pravda, potom impedance zdroje by neměla vliv na velikost harmonického napětí na zdroji. Ve skutečnosti velikost tohoto napětí je úměrná (v určitém rozsahu) impedanci zdroje takže se generátory chovají jako proudové zdroje.

Impedance zdrojů jsou velmi malé, a tedy zkreslení harmonického napětí způsobené harmonickým proudem je také nízké a často obtížně pozorovatelné vůči pozadí sítě. Toto konstatování může být zavádějící, protože to dává dojem, že nemůže existovat žádný problém s harmonickými, i když ve skutečnosti jsou zde velké harmonické proudy. Je to obdobné jako bychom se pokoušeli zjistit zemní proudy pomocí voltmetru. Kdykoliv ověřujeme harmonické nebo když ověřujeme jejich neexistenci, musíme měřit proud.

Problémy způsobené harmonickými

Harmonické proudy způsobují problémy jak v napájecích sítích, tak i v elektroinstalacích. Následky a jejich řešení jsou velice rozdílné a vyžadují individuální přístup. Měření, která slouží k řízení vlivu harmonických v elektroinstalacích nemusí vždy nutně vest k redukci harmonického zkreslení způsobené napájecí síti a naopak.

Problémy s harmonickými v elektroinstalacích

Některé obecně známé problémy způsobené harmonickými:

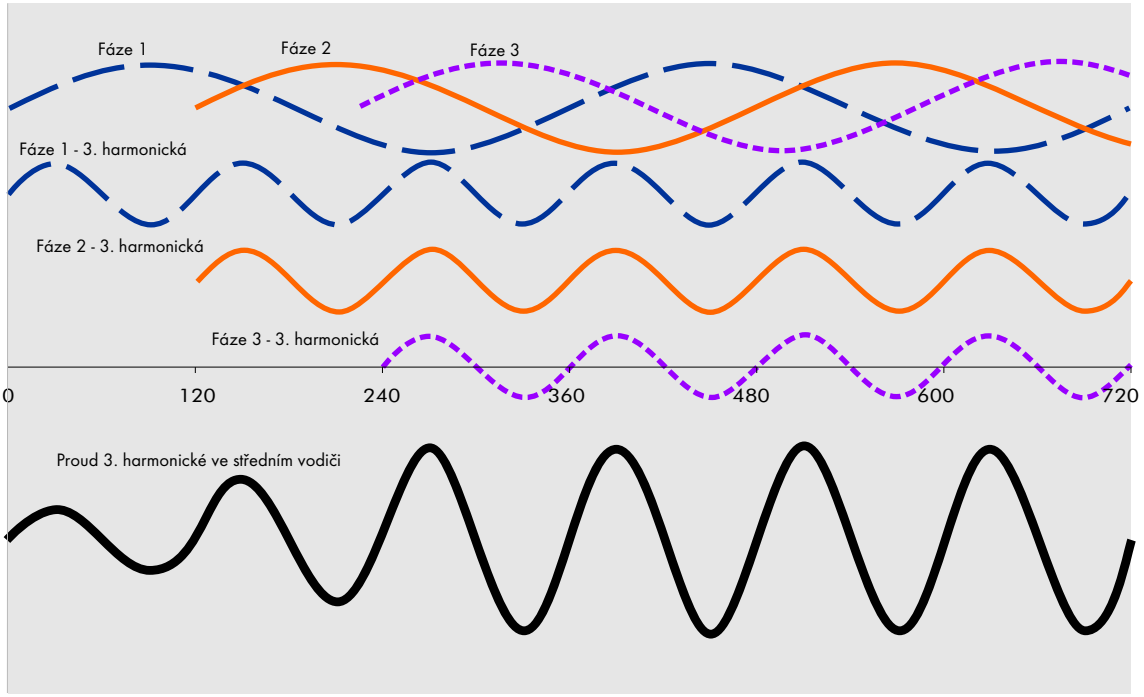
- Problémy způsobené harmonickými proudy
  - přetížení středního vodiče
  - přehřátí transformátorů
  - rušení při spínání vypínačů
  - přetěžování kompenzačních kondenzátorů
  - skinefekt
- Problémy způsobené harmonickými napětími
  - harmonické zkreslení napětí
  - indukční motory
  - poruchy při průchodu nulou
- Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti

Všechny výše uvedené problémy jsou stručně diskutovány v následujících odstavcích.

Problémy způsobené harmonickými proudy

Přetížení (přehřívání?) středního vodiče

V trojfázové síti jsou fázová napětí vzájemně posunuta o 120°, a tedy pokud jsou všechny fáze stejně zatíženy, je výsledný proud ve středním vodiči nulový. Jestliže je zatížení nevyvážené (jednotlivé fáze nejsou stejně zatíženy), pak ve středním vodiči protéká proud, který je výsledkem vektorového součtu fázových proudů a který je menší, než proudy fázové. Z těchto důvodů se v minulosti (v souladu s normami) začaly používat pro trojfázové rozvody kabely se středním vodičem o nižším průřezu. Jestliže se při stejném zatížení fází proud základní harmonické ve středním vodiči neobjeví, nelze to bohužel říci o proudech harmonických, kde proudy třetí harmonické a jejich násobků (3n) se naopak ve středním vodiči sčítají, jak je ukázáno na obr. 12. Na obrázku jsou v horní části uvedeny fázové proudy základní harmonické, posunuté o 120°. Složky třetí

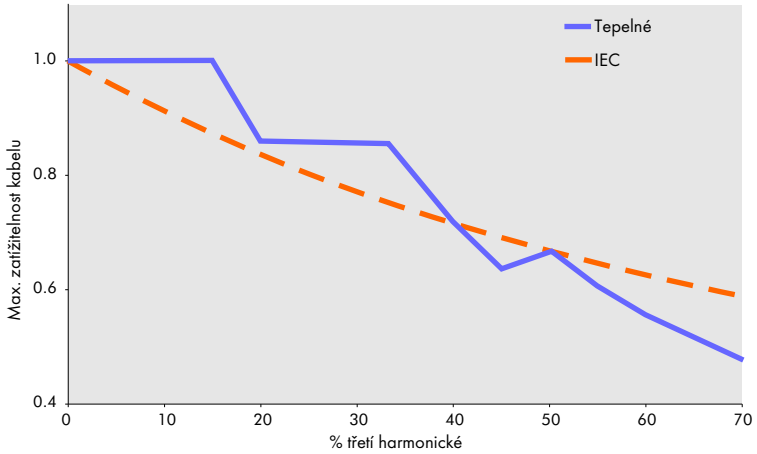


Obrázek 12 - Sčítání 3n harmonických proudů ve středním vodiči

harmonické ve fázových proudech jsou uvedeny ve střední části obrázku. Při stejné amplitudě a posunutí o 360° (3 x 120°) se ve středním vodiči sčítají, jak je uvedeno na dolním průběhu. V tomto případě 70% proudu třetí harmonické v každé fázi má za následek 210% hodnoty fázového proudu ve středním vodiči.

Případové studie v komerčních budovách obecně dokazují, že proud ve středním vodiči se pohybuje mezi 150% až 210% hodnoty fázového proudu, často v kabelech s polovičním průřezem středního vodiče.

Jsou určité pochybnosti, jak se mohou projektanti s tímto problémem vyrovnat. Při použití samostatných vodičů lze instalovat vodič pro střední vodič s dvojnásobným průřezem, nebo dva paralelní vodiče o stejném průřezu, jako vodiče fázové. Situace u vícežílových kabelů je složitější. U zatížitelnosti těchto vícežílových kabelů předpokládáme (např. dle IEC 60364-5-523), že zatížení je symetrické, vyvážené a že středním vodičem neprotéká žádný proud. Jinými slovy, pouze třemi ze čtyř nebo pěti vodičů protéká proud, který kabel ohřívá. Jelikož je zatížitelnost vodičů omezena výhradně jejich ohřátím na maximální dovolenou teplotu, je zřejmé, že u kabelů zatěžovaných 3n harmonickými proudy musí být jejich jmenovité zatížitelnosti změněny. Dle výše uvedeného příkladu bude kabel zatěžován pěti jednotkami proudu, třemi ve fázích a dvěmi ve středním vodiči, místo původně předpokládaných tří jednotek. Musí být tedy snížena jeho zatížitelnost asi na 60% jmenovité hodnoty.



Obrázek 13 - Přepočet zatížení kabelu pro 3n harmonickou

Norma IEC 60364-5-523, dodatek C (informativní) doporučuje rozsah snížení zatížení v závislosti na velikosti 3n harmonického proudu. Obr. 13 uvádí přepočítací koeficienty dle obsahu 3n harmonických proudů podle IEC 60364-5-523, dodatek C a podle tepelných přepočtů, uvedených výše.

Tato pravidla jsou v současné době diskutována a je pravděpodobné, že v blízké budoucnosti budou nová doporučení zahrnuta do národních standardů.

Vlivy na transformátory

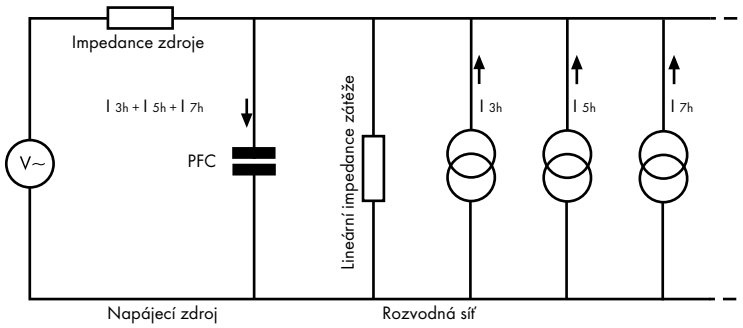
Transformátory jsou harmonickými ovlivňovány dvojím způsobem. Za prvé, ztráty vířivými proudy, které jsou normálně okolo 10% ztrát při plném zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. Ve skutečnosti u transformátoru plně zatíženého nelineární zátěží IT technologií budou celkové ztráty dvojnásobné oproti ztrátám s lineární zátěži. Výsledkem toho je u takového transformátoru mnohem vyšší provozní teplota a kratší životnost. Prakticky za těchto okolností může být snížena životnost transformátoru ze 40 let až na 40 dní! Naštěstí jen málo transformátorů je plně zatíženo, ale tento jev musí být uvažován při volbě zařízení.

Druhý vliv je spojen s 3n harmonickými. U vinutí zapojeného do trojúhelníka jsou tyto harmonické ve fázi, takže se uzavírají v tomto vinutí a nešíří se do napájecí sítě. Tedy pro 3n harmonické je transformátor zapojený do trojúhelníka jako izolační, přičemž harmonické jiných řádů transformátorem procházejí. Cirkulující 3n harmonické proudy musí být brány v úvahu při stanovení jmenovitého zatížení transformátoru.

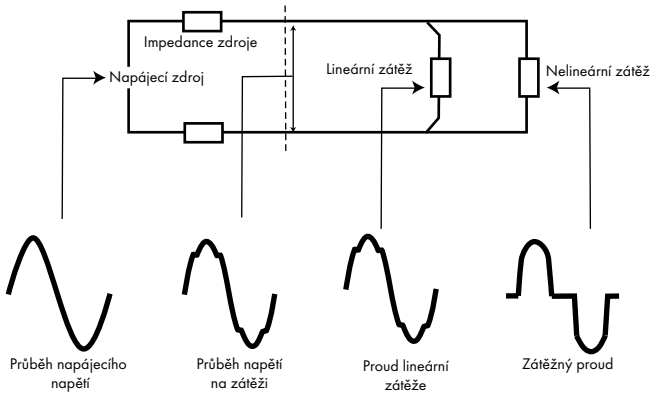
Podrobnou diskusi o jmenovitém zatížení transformátorů při zatěžování harmonickými proudy lze nalézt v dalších kapitolách tohoto Průvodce.

Rušení při spínání vypínačů

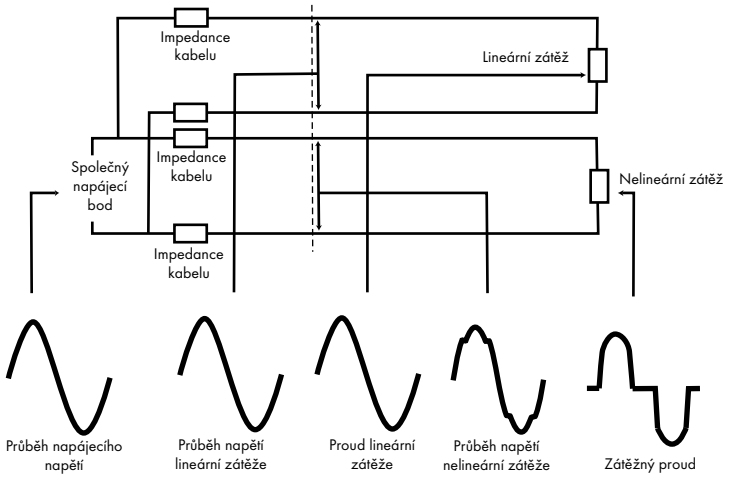
Proudové chrániče vypínají, jestliže je součet proudů ve fázových vodičích a ve středním vodiči mimo nastavené meze. Rušení při spínání těchto vypínačů může být způsobeno harmonickými ze dvou důvodů. Za prvé tyto vypínače jako elektromechanická zařízení nemusí sčítat harmonické složky proudu korektně a proto vypínají chybně. Za druhé, některá zařízení generující harmonické, generují i spínací poruchy, které musí být filtrovány v napájecím obvodem zařízení. Filtry, které se normálně k tomuto účelu užívají, mají



Obrázek 14 - Náhradní schéma pro nelineární zátěž a kompenzační kondenzátor



Obrázek 15 - Zkreslení napětí vlivem nelineární zátěže



Obrázek 16 - Oddělení lineární a nelineární zátěže

zapojeny kondenzátory mezi fázemi, středním vodičem a zemí, a díky tomu teče malý proud do země (svodový proud). Velikost tohoto proudu je limitována normami dle kterých musí být menší než 3,5 mA, a obvykle je mnohem menší, ale je-li zařízení připojeno pouze do jednoho obvodu, může tento svodový proud způsobit vypnutí. Tuto situaci lze jednoduše řešit využitím více obvodů, z nichž každý napájí několik zátěží. V dalších částech Průvodce bude detailně řešena problematika zemních svodů.

Rušení při spínání miniaturních vypínačů je vesměs způsobeno tím, že protékající proud je větší, než očekávaný dle výpočtů nebo jednoduchých měření, právě vlivem harmonických. Mnoho přenosných měřících přístrojů neměří správně efektivní hodnoty a pak mohou být podhodnoceny nesinusové proudy až o 40%. Správné měření efektivní hodnoty je diskutováno v části 3.2.2 Průvodce.

Přetěžování kompenzačních kondenzátorů

Kompenzační kondenzátory jsou využívány ke kompenzaci fázového posunutí zpožděného proudu při induktivní zátěži (jako jsou např. indukční motory). Na obr. 14 je uvedeno náhradní schéma pro kompenzační kondenzátor s nelineární zátěží. Impedance kondenzátoru klesá s kmitočtem, zatím co impedance sítě, která je obecně induktivní, se stoupajícím kmitočtem roste. Proto je kondenzátor více zatěžován harmonickými složkami proudů vyšších řádů, a pokud není individuálně dimenzován, může dojít k poškození kondenzátoru.

Vážnějším problémem je rezonance kapacity kondenzátoru s indukčností napájecí sítě v blízkosti harmonických kmitočtů (které se vyskytují ve 100 Hz intervalech). V takových případech se mohou objevit velké hodnoty napětí nebo proudů, které často vedou k haváriím kompenzačních jednotek.

Rezonancím se můžeme vyvarovat tak, že ke kondenzátorům přidáme do série takovou tlumivku (indukčnost), aby celková impedance byla induktivní pro nejmenší výraznou harmonickou. Toto řešení omezuje harmonický proud tekoucí do kondenzátoru. Velikost sériové tlumivky může být problém zejména jsou-li přítomny harmonické nízkých řádů.

Skin efekt

Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Tento jev je znám jako skinefekt, který se více projevuje na vyšších kmitočtech. Skinefekt je obvykle zanedbáván, protože při základním kmitočtu se projevuje velmi málo, ale u kmitočtů nad 350 Hz, tj. od 7. harmonické a výše, se stává skinefekt významným, protože způsobuje přídavné ztráty a oteplení. Tam, kde jsou proudové harmonické musí projektanti uvažovat skinefekt při návrhu kabelů. Mnohožílové kabely a vrstvené přípojnice mohou být využity při řešení tohoto problému. Je ale nutno dávat pozor, aby použitý systém přípojnic zamezil mechanickým rezonancím na harmonických kmitočtech. Průvodce pro projektanty v obou případech je v CDA publikaci 22 „Měď pro přípojnice“.

Problémy způsobené harmonickými napětími

Harmonický proud zátěže způsobuje napěťové zkreslení na impedanci napájecí sítě (to je původ „ploché křivky“). Jsou zde dvě části impedance impedance vnitřních kabelů od společného napájecího bodu (PCC) a základní impedance napájecí sítě k PCC, např. lokálního napájecího transformátoru. Situace je uvedena na obr. 15.

Deformovaný odběrový proud nelineární zátěže způsobuje zdeformované úbytky napětí na impedanci kabelů. Výsledné zkreslené napětí je využíváno pro všechny ostatní připojené zátěže a způsobuje průtok neharmonického proudu a to i v případě lineárních zátěží.

Řešením je oddělení obvodů se zátěžemi generujícími harmonické proudy od obvodů se zátěžemi citlivými na harmonické, jak je ukázáno na obr. 16. Zde jsou samostatné obvody, které z PCC napájejí lineární a nelineární zátěže. Napěťové zkreslení vlivem nelineární zátěže pak nemá vliv na napájení lineární zátěže.

Při posouzení harmonického zkreslení je nutno připomenout, že při napájení zátěže přes UPS nebo při využití záložního generátoru při poruše, může být impedance napájecí sítě a tím i napěťové zkreslení mnohem větší.

Jsou-li instalovány lokální transformátory, pak mohou být voleny tak, aby měly dostatečně nízkou výstupní impedanci a dostatečnou schopnost odolávat přídavnému ohřívání, jinými slovy dostatečně předimenzované transformátory. Věnujte pozornost tomu, že není vhodné navrhovat transformátor, u kterého je nárůst kapacity dosažen pouze přídavným chlazením. V tomto případě bude zvýšená vnitřní teplota a tím snížena životnost. Přídavné chlazení má být využito pouze v případě nebezpečí a nikoliv při normálním provozu.

Indukční motory

Napěťové zkreslení způsobuje nárůst ztrát vířivými proudy podobně jako u transformátorů. Přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé se pokouší otáčet motorem různou rychlostí dopředu nebo dozadu. Proudy indukované do rotoru na vyšších kmitočtech pak dále zvyšují ztráty. Pokud je očekáván výskyt harmonicky zkresleného napětí, pak by měly být motory dimenzovány s uvažováním přídavných ztrát.

Poruchy při průchodu nulou

Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napájecí napětí prochází nulou, aby stanovily okamžik vypnutí zátěže. Je to dáno tím, že vypínání induktivní zátěže při průchodu nulou nezpůsobuje přechodové jevy a tím se redukují elektromagnetické interference (EMI) a namáhání polovodičových spínacích zařízení. Jsou-li v napájecím napětí harmonické, nebo přechodové jevy, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, což vede k nepravidelnostem v provozu regulátorů. Může zde být dokonce i několik průchodů nulou během jedné půlperiody.

Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecí síti

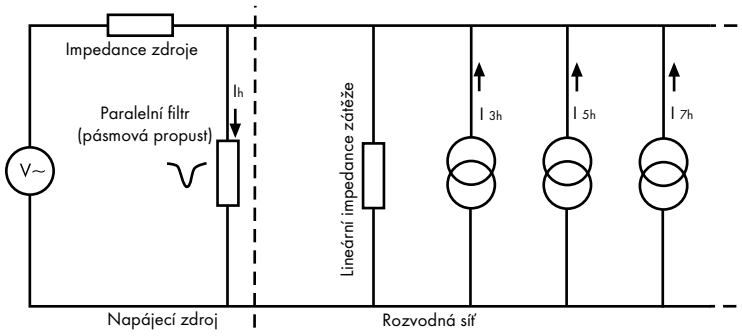
Jestliže má harmonický proud původ v napájecí síti, pak roste harmonické zkreslení napětí úměrně impedanci napájecí sítě ve společném napájecím bodě (PCC) a harmonickému proudu. Jelikož impedance napájecí sítě je obecně induktivního charakteru, její amplituda roste se zvyšujícím se kmitočtem. Samozřejmě, pokud je napětí deformováno harmonickými proudy z jiných nelineárních spotřebičů a zkreslením příslušícím transformátoru, každý další spotřebič přispívá k tomuto deformování.

Tedy zákazníkům nemůže být dovoleno zvyšovat znečištění sítě tak, aby způsobovali újmu jiným zákazníkům. Proto jsou v mnoha zemích stanoveny limity pro generování harmonických proudů do napájecí sítě. Řada těchto předpisů vychází z anglické normy G5/3, vydané v roce 1975 a nahrazené v roce 2001 normou G5/4. Tyto normy jsou dále diskutovány v tomoto Průvodci.

Poznámka.
V České republice byly přijaty evropské a mezinárodní normy v oblasti elektromagnetické kompatibility (EMC), které stanoví pravidla a limity pro zařízení generující harmonické.

Možnosti omezení harmonických

Možnosti vhodné pro regulování amplitudy harmonických proudů jsou detailně diskutovány v dalších částech Průvodce. V této části je podán pouze krátký všeobecný přehled. Metody omezení harmonických lze rozdělit do tří skupin: pasivní filtry, transformátory pro izolaci a redukci harmonických a aktivní řešení. Každá metoda má své výhody i nevýhody, takže neexistuje jediné nejlepší řešení. Je velmi jednoduché vynaložit značnou sumu peněz na nevhodné a neefektivní řešení; zásadní je však provést důkladné prošetření stavu. Vhodné prostředky k tomuto účelu jsou popsány v tomto Průvodci.

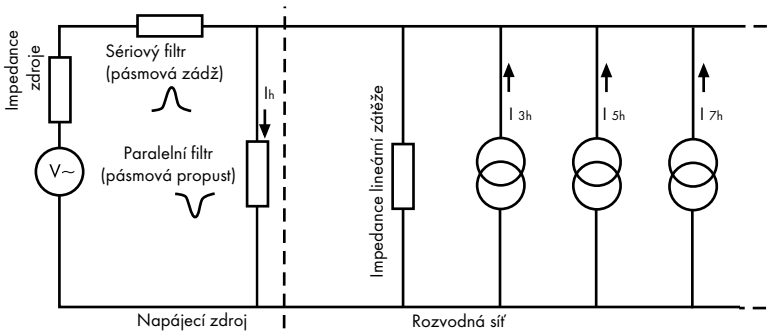


Obrázek 17 - Paralelní pasivní filtr harmonických

Pasivní filtry

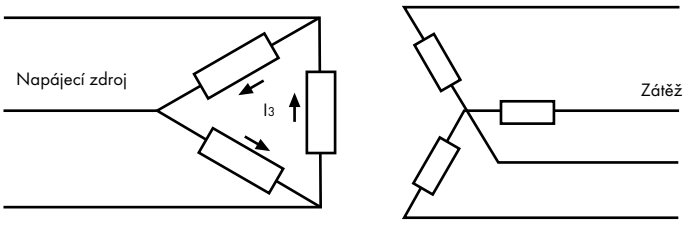
Pasivní filtry se užívají, aby zajistily cestu s nízkou impedanci pro harmonické proudy, takže tyto se uzavírají přes filtr a ne přes napájecí síť (obr. 17). Filtry mohou být navrhovány pro jednu harmonickou, nebo širokopásmové.

Občas je nutno navrhnout komplexnější řešení pro zvýšení sériové impedance na harmonickém kmitočtu, čímž se omezí podíl proudu tekoucího zpět do napájecí sítě, jak je ukázáno na obr. 18.



Obrázek 18 - Paralelní a sériový pasivní filtr

Jednoduché sériové pásmové zádrže jsou občas navrhovány buď ve fázi, nebo ve středním vodiči. Sériové filtry jsou navrhovány tak, aby blokovaly harmonické proudy a ne aby zajišťovaly řízenou cestu pro ně, a byl na nich velký úbytek harmonického napětí. Tento úbytek harmonického napětí se přes napájení objeví na zátěžích. Přestože je napájecí napětí značně zkresleno, nepřekračuje meze norem, dle kterých jsou zařízení navrhovány a garantovány. Některá zařízení jsou poměrně citlivá na zkreslení napětí a některá jsou citlivá velmi. Sériové filtry mohou být použity za určitých okolností, ale musí být aplikovány opatrně. Nelze je doporučit jako obecné řešení.



Obrázek 19 - Napájecí transformátor v zapojení trojúhelník - hvězda

Izolační transformátory

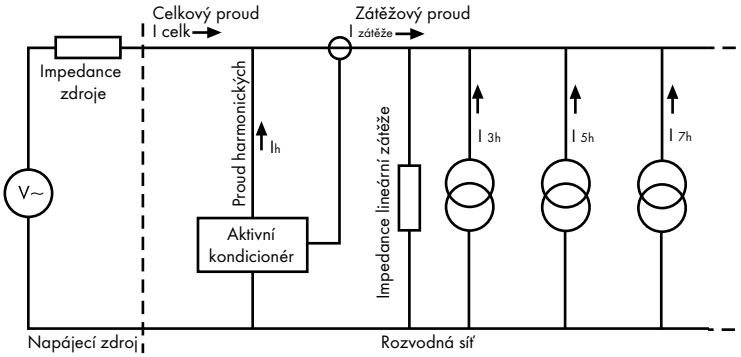
Jak bylo zmíněno výše, 3n harmonické proudy se uzavírají ve vinutí zapojeném do

trojúhelníka. Ačkoli toto je problém pro výrobce transformátorů - přídavné zatížení je nutno brát v úvahu - přináší užitek i projektantům napájecích systémů, protože izoluje 3n harmonické proudy od napájecí sítě.

Tentýž efekt se dosáhne při použití transformátorů v zapojení lomená hvězda. Lomená hvězda je zapojení do hvězdy s částečnou vazbou mezi fázovými vinutími.

Aktivní filtry

Doposud zmíněná řešení byla vhodná pouze pro jednotlivé harmonické, izolační transformátory pouze pro 3n harmonické, pasivní filtry jen pro navržený kmitočet. V některých elektroinstalacích je obsah harmonických málo předvídatelný. V mnoha elektroinstalacích IT jsou například různá zařízení a jejich umístění se stále mění, čímž se stále mění i situace z hlediska harmonických. Vyhovujícím řešením v takovém případě jsou aktivní filtry nebo aktivní kondicionéry.



Obrázek 20 - Aktivní harmonický kondicionér

Jak je ukázáno na obr. 20, je aktivní filtr zapojen paralelně. Proudový transformátor měří obsah harmonických v proudu zátěže, který je přiveden do regulátoru aktivního filtru, který pomocí generátoru proudu vytváří kopii „zbytkového proudu“, a díky tomu je v následujícím cyklu přiveden do napájení s opačnou fází. Jelikož jsou harmonické proudy „vyrobeny“ v aktivním filtru (kondicionéru), je z napájecí sítě odebírán pouze proud první harmonické. V praxi je obsah harmonických proudů v napájení redukován o 90% a protože je snížená impedance sítě na harmonických kmitočtech, je redukováno i harmonické zkreslení napětí.

Závěr

Prakticky všechna elektrická a elektronická moderní zařízení obsahují spínané napájecí zdroje nebo mají nějakou formu regulace výkonu, takže představují nelineární zátěž. Lineární zátěže se vyskytují relativně zřídka, přičemž žárovky a neregulované ohřevy lze uvést jak známé příklady.

Budoucí normy pro zařízení jsou detailně diskutovány v následující části Průvodce, ale pro reálný vliv na harmonické zkreslení vlivem elektronických zařízení, jako jsou například počítače, nebudou dostatečné. To je skupina zařízení, která způsobuje v současné době mnoho problémů s harmonickými jak v průmyslu, tak i obchodu, částečně proto, že je v provozu značné množství těchto zařízení, a částečně také proto, že produkují zejména 3n proudové harmonické, které způsobují mnoho problémů.

Jelikož množství těchto zařízení stoupá, i přes velmi přísná normalizační omezení je pravděpodobné, že harmonické znečištění se bude stále zvětšovat. To je riziko pro obchod, který potřebuje vhodné investice do dobré projekční praxe, správných elektrických zařízení a dobré údržby.

Evropská střediska promoce mědi

Země Beneluxu
Copper Benelux
Avenue de Tervueren 168
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 7090
Fax: 00 32 2 777 9099
Email: mail@copperbenelux.org
Website: www.copperbenelux.org

Kontakt: Mr. B. Dóme - Ředitel

Francie
Centre d´Information du Cuivre et Lations
30 Avenue de Messine
F-75008 Paris

Tel: 00 33 1 42 25 25 67
Fax: 00 33 1 49 53 03 82
Email: centre@cuivre.org
Website: www.cuivre.org

Kontakt: Mr. P. Balzy - Ředitel

Německo
Deutsch Kupfer-Institut e.V
Am Bonneshof 5
D-40474 Dusseldorf

Tel: 00 49 211 4796 300
Fax: 00 49 211 4796 310
Email: info@kupferinstitut.de
Website: www.kupferinstitut.de

Kontakt: Dr. W. Seitz - Ředitel

Řecko
Hellinic Copper Development Institute
74 L Riankour Str
GR-115 23 Athens

Tel: 00 30 1 690 4406-7
Fax: 00 30 1 690 4463
Email: info@copper.gr

Kontakt: Mr. D. Simopoulos Ředitel

Česká republika, Maďarsko, Slovensko
Hungarian Copper Promotion Centre
Képíró u. 9
H 1053 Budapest
Maďarsko

Tel: 00 36 1 266 4810
Tel: 00 36 1 266 4804
Email: hcpc.bp@euroweb.hu
Website: www.hcpcinfo.org

Kontakt: Mr. R. Pintér - Ředitel

Itálie
Instituto Italiano del Rame
Via Corradion D´Ascaino 1
I-20142 Milano

Tel: 00 39 02 89301330
Fax: 00 39 02 89301513
Email: ist-rame@wirenet.it
Website: www.iir.it

Kontakt: Mr. V. Loconsolo - Ředitel

Polsko
Polish Copper Promotion Centre Sa
Pl. 1 Maja 1-2
Pl 50 136 Wroclaw

Tel: 00 48 71 78 12 502, 78 12 383
Fax: 00 48 71 78 12 504
Email: copperpl@wroclaw.top.pl

Kontakt: Mr. P. Jurasz - Ředitel

Skandinávie
Scandinavian Copper Development Association
Kopparbergsvagen 28
S-72188 Vasteras Sweden

Tel: 00 46 21 19 86 20
Fax: 00 46 21 19 80 35
Email: scda.info@outkumpu.fi
Website: www.scda.com

Kontakt: Mrs. M. Sundberg - Ředitelka

Španělsko
Centro Espanol de Informacion del Cobre
Princesa 79
E-28008 Madrid

Tel: 00 34 91 544 8451
Fax: 00 34 91 544 8884
Email: cedic@pasanet.es

Kontakt: Mr. J. R. Morales - Ředitel

Velká Británie
Copper Development Association
Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans
Hertfordshire Al1 1AQ

Tel: 00 44 1727 731200
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Website: www.cda.org.uk & www.brass.org

Kontakt: Mrs. A. Vessey - Manažerka

David Chapman

HUNGARIAN COPPER PROMOTION CENTRE

Hungarian Copper Promotion Centre
Képíró u. 9
H - 1053 Budapest
Maďarsko
Tel: 00 36 1 266 4810
Tel: 00 36 1 266 4804
Email: hcpc.bp@euroweb.hu
Website: www.hcpcinfo.org

VŠB - TU Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky
17. listopadu 15
CZ 708 33 Ostrava-Poruba
Tel: +420 597324279
Tel: +420 596919597
Email: pavel.santarius@vsb.cz
Website: homen.vsb.cz/~san50/

European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium
Tel: 00 32 2 777 70 70
Tel: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org