

Osnovne informacije o harmonikih

Fenomen, ki se je pojavil v zadnjih nekaj desetletjih, to je harmonski tokovi v električnih inštalacijah, postaja vedno večji problem. Kot družba se moramo prilagoditi prisotnosti harmonskih komponent v električni mreži, povzročajo jo pač široka uporaba močnostne elektronike. V tem poglavju bomo najprej naredili kratek in dobro ilustriran pregled harmonikov. To nam bo pomagalo k njihovem razumevanju in razumevanju kompleksnih problemov, ki jih povzročajo v električnih inštalacijah.

Izvor harmonskih tokov

Osnovni vrok za nastanek harmonikov je zelo velika rast opreme, ki vsebuje močnostno elektroniko. Samo v sektorjih računalništva in telekomunikacij je za prihodnja leta napovedana rast več kot 10% na leto. Ta dva sektorja uporabljata elektronska vezja, ki zahtevajo enosmerni tok. S tem je pojasnjeno, zakaj napajalniki v teh napravah na vseh vstopih vsebujejo usmernik, ki

povzročajo posebne oblike motenj, imenovane harmonski tokovi.

Drugi izvori harmonskih tokov pa so:

- fluorescenčne žarnice;
- žarnice na električno praznjenje;
- varilne naprave;
- regulirani pogoni (frekvenčni pretvorniki);
- naprave z magnetnim jedrom, kjer lahko pride do nasičenja.

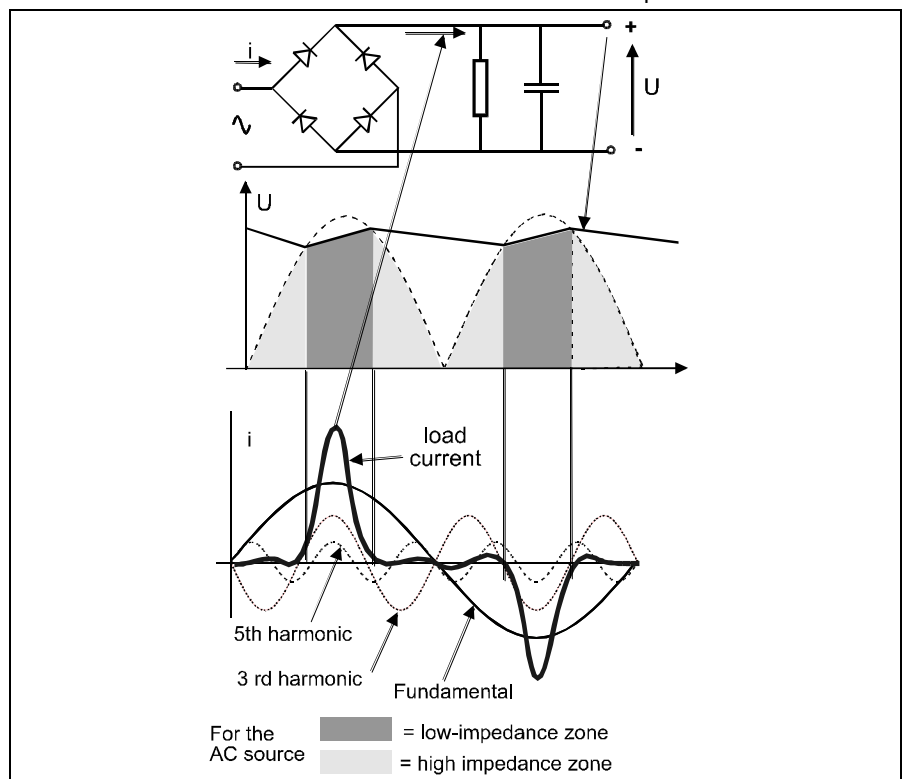
Posebni aspekti harmonskih tokov

Bremena, ki povzročajo harmonske tokove, predstavljajo skupino, imenovano "nelinearna bremena", ker se njihova impedanca spreminja z napetostjo, priključeno na vhodne priključke. Včasih se imenujejo tudi bremena, ki kvarijo ali, ki onesnažujejo.

Nelinearna bremena

Harmonski tokovi so posledica nelinearnih bremen.

Primer so RCD bremena (R - upor, C - kondenzator, D - dioda, glej sliko 2.1), ki se nahajajo v veliki večini močnih napajalnikov, ki se uporabljajo v elektronskih napravah.



Slika 2.1 : RCD bremena povzročajo harmonike.

Osnovne informacije o harmonikih (nadaljevanje)

V tem primeru se v stacionarnem delovanju kondenzator C polni samo, kadar je trenutna napetost večja od že obstoječe napetosti na njegovih priključkih.

Od tega trenutka dalje je impedanca bremena nizka (dioda prevaja), medtem ko je bila prej visoka (dioda zaprta).

Impedanca nelinearnega bremena se torej spreminja glede na napetost na priključkih.

Ohmov zakon, ki definira linearno funkcijo med sinusno napetostjo in tokom, ne velja več, ker impedanca ni konstantna in napetost in tok nimata več sinusne oblike.

Oblika toka je bolj komplicirana in jo lahko predstavimo kot vsoto toka iste frekvence, kot je napetost, imenovanega tok osnovnega vala in ostalih tokov s frekvencami $n f$ (n je celo število >1), imenovanih harmoniki (Fourierov teorem).

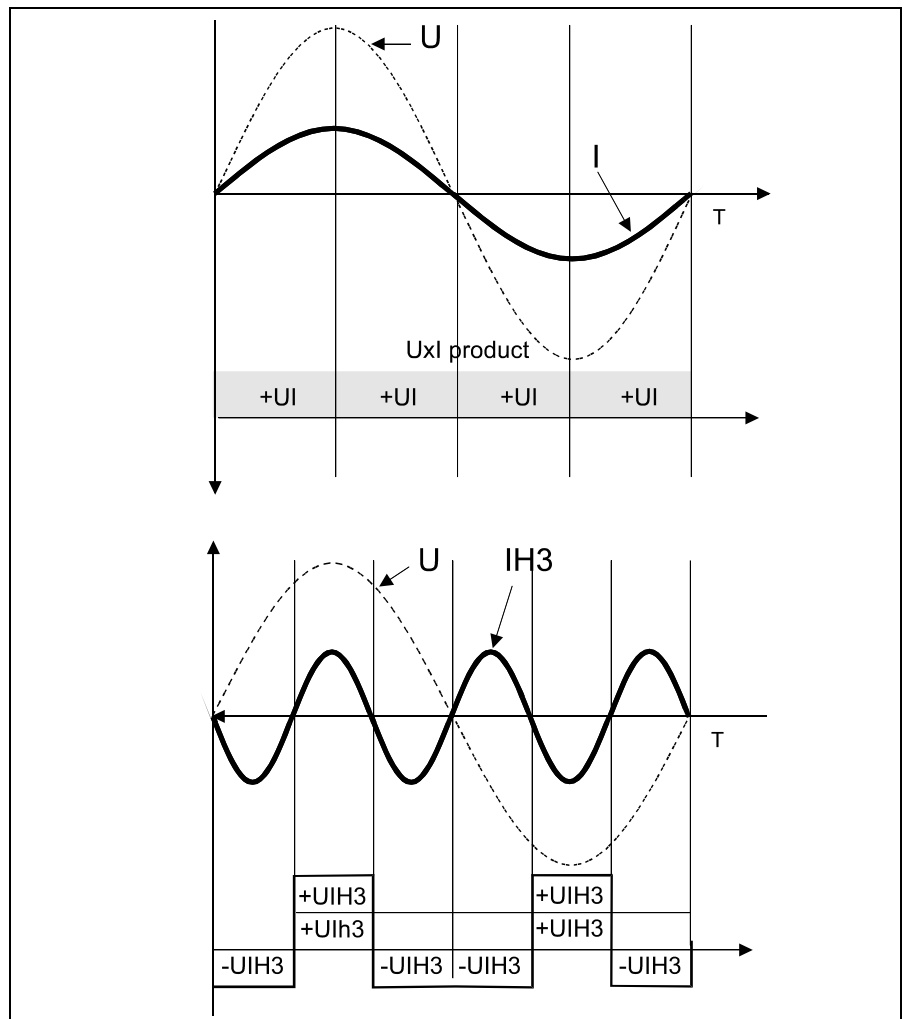
Slika 2.1 daje splošno idejo o RCD – bremenu, kaže pa samo dva reda harmonikov, I_{H3} in I_{H5} .

Aktivna in reaktivna moč ničelne vrednosti

Slika 2.2 kaže, da je produkt napetosti osnovne frekvence brez harmonikov pomnožene s tokom tretjega harmonika ob koncu ene periode enak nič. Ta rezultat je enak, ne glede na fazo in red harmonika. Posledica je jasna.

Pri rotacijskih strojih je rezultirajoči vrtilni moment motorja enak nič. Obstaja samo parazitski pulzni vrtilni moment, ki pa povzroča samo vibracije. Edina prisotna aktivna moč spremlja padec napetosti, ki jo v vodniku z uporom r ($r I_{Hn}^2$) povzroča harmonski tok (I_{Hn}).

V električnih napravah harmoniki ne povzročajo niti aktivne niti reaktivne moči, pozročajo samo izgube na osnovi Joulovega efekta ($r i^2$).



Slika 2.2 : $U \times I$ produkt za osnovne komponente (zgoraj) in osnovne komponente s harmoniki (spodaj).

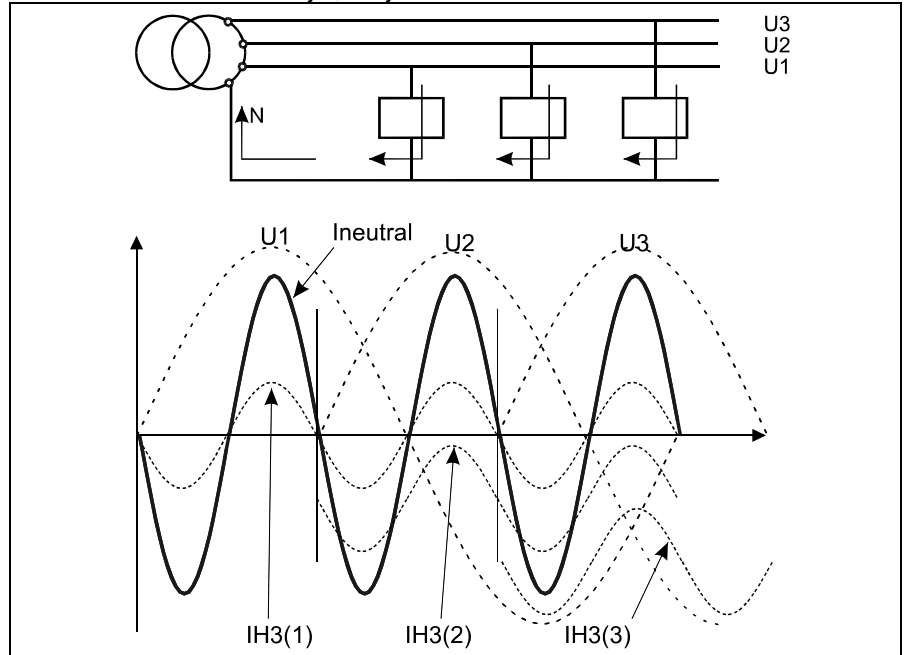
Osnovne informacije o harmonikih (nadaljevanje)

Upoštevajte tok v ničelnem vodniku, ki je posledica enofaznih bremen, ki povzročajo harmonike tretjega reda in njihovih celih mnogokratnikov.

Trifazna porazdelitev v ničelnem vodniku

Vsi harmonski tokovi tretjega reda in njihovi celi mnogokratniki se v nevtralnem vodniku seštevajo, kot je

prikazano na sliki 2.3. Rezultat so pomembne izgube. $(r I_{ničeln}^2)$ = povišanje temperature ničelnega vodnika.



Slika 2.3 : Vsota harmonikov tretjega reda in njihovih celih mnogokratnikov v ničelnem vodniku.

Karakteristične harmonske vrednosti

V nadaljevanju je pregled osnovnih harmonskih vrednosti in enačb.

Komponente harmonskega toka

Efektivna vrednost osnovne tokovne komponente se imenuje I_{H1} in je izražena v A efektivno.

Efektivna vrednost harmonske komponente se imenuje I_{Hn} , kjer je n red harmonika.

Te efektivne vrednosti je mogoče meriti, ker so razni harmonski tokovi, ki sestavljajo skupni tok, sinusni, imajo pa različne frekvence, ki so mnogokratniki osnovne frekvence. Za ugotavljanje njihovih vrednosti je potrebna harmonska analiza.

Posamezni harmoniki

Vsak harmonik je izražen kot procentna vrednost osnovnega vala, imenovan I_{hn} .

$$I_{hn} = 100 \frac{I_{Hn}}{I_{H1}}$$

Spodaj prikazane vrednosti, izražene kot efektivne vrednosti komponent, so lahko izražene kot posamezni harmoniki.

Skupen efektivni tok

$$I_{rms} = \sqrt{I_{H1}^2 + I_{H2}^2 + I_{H3}^2 + \dots + I_{Hn}^2}$$

Skupno popačenje zaradi harmonskega toka (total harmonic current distortion)

$$THDI = 100 \times \frac{\sqrt{I_{H2}^2 + I_{H3}^2 + \dots + I_{Hn}^2}}{I_{H1}}$$

(THDI pomeni "Total Harmonic Distortion", kjer je I tok).

Močnostni faktor

Močnostni faktor je razmerje med aktivno močjo (kW) in navidezno močjo S (kVA) na priključkih danega nelinearnega bremena.

$$\lambda = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}}$$

Med napetostjo in tokom ni faznega premika, ker oba nista več sinusna. Fazni premik φ_1 med napetostjo in tokom osnovnega vala, kjer sta oba sinusna, lahko definiramo kot:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1 \text{ (kW)}}{S_1 \text{ (kVA)}}$$

kjer sta P_1 in S_1 aktivna in reaktivna moč osnovne frekvence.

Osnovne informacije o harmonikih (nadaljevanje)

Upoštevajte, da v prisotnosti harmonikov močnostni faktor λ in $\cos \varphi_1$ (φ_1 = fazni premik med napetostjo in tokom osnovnega vala) nista enaka.

Drug način tega izraza je:

$$\lambda = \frac{IH_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{IH_1^2 + IH_2^2 + \dots + IH_n^2}}$$

kjer je $IH_1 \cos \varphi_1$ aktivna komponenta toka osnovnega vala IH_1 .

Faktor popačenja je definiran kot:

$$v = \frac{\lambda}{\cos \varphi_1} \quad (\text{kot definirano po IEC 60146})$$

Kjer ni harmonikov, je ta faktor enak 1 in močnostni faktor je enostavno $\cos \varphi$.

Moč

■ Vrednosti moči na priključkih simetričnega trifaznega **linearnega bremena**, kjer sta prisotna napajalna medfazna napetost U in tok I , fazni premik med U in I pa φ , so sledeče:

- P navidezna = $S = UI$, v kVA;
- P aktivna = $S \cos \varphi$, v kW;
- P reaktivna = $Q = S \sin \varphi$, v kVAR;
- $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

■ Na priključkih **nelinearnega bremena** pa je enačba za P bolj komplicirana, ker U in I vsebujeta

harmonike. Enostavno se jo da izraziti kot:

$$\square P = S \lambda \quad (\lambda = \text{močnostni faktor})$$

Za veličini osnovnega vala U_1 in I_1 , med katerima je kot φ_1 , velja:

$$\square P \text{ navid. osn.} = S_1 = U_1 I_1 \sqrt{3}$$

$$\square P \text{ aktiv. osn.} = P_1 = S_1 \cos \varphi_1$$

$$\square P \text{ reakt. osn.} = Q_1 = S_1 \sin \varphi_1$$

$$\square S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}$$

kjer je D faktor popačitve zaradi harmonikov.

Temenski faktor

Temenski faktor (F_c), ki se uporablja za označevanje oblike signala (napetosti ali toka), je razmerje med med temensko in efektivno vrednostjo.

$$F_c = \frac{\text{crest value}}{\text{rms value}}$$

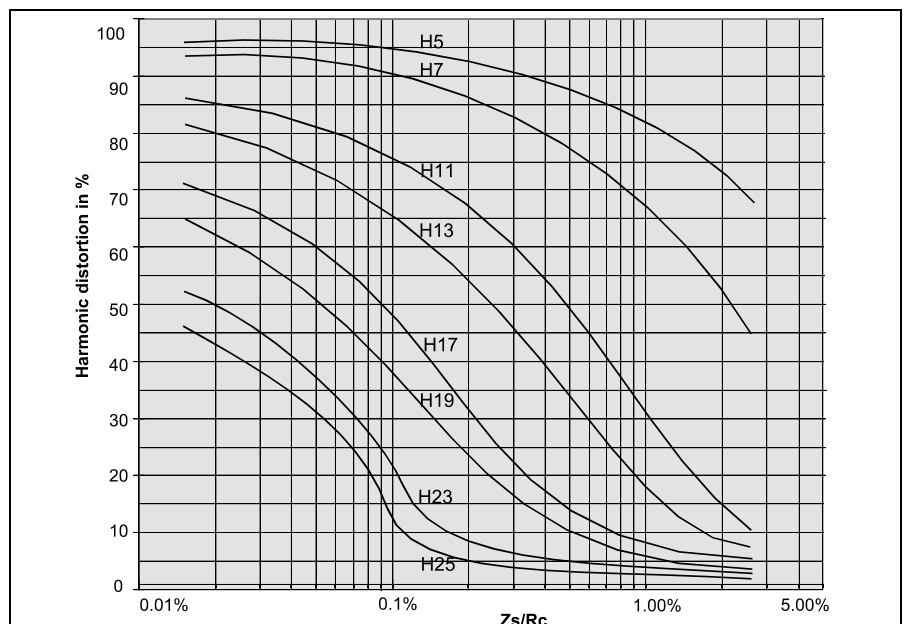
Tipične vrednosti za različna bremena so sledeča:

- linearno breme: $F_c = 1.414$
- veliki računalniki: $F_c = 2$ to 2.5
- PC: $F_c = 2$ to 3

Vpliv izvora in impedance linije na spekter harmonikov nelinearnega bremena

Za enofazna in trifazna RCD bremena (nekompenzirana z induktivnostjo), kjer se mora kondenzator hitro spreminjati, je impedanca pred bremenom odločilna za nivo vsakega harmonika.

Graf na sliki 2.4 prikazuje tak primer, kjer je Z_s vsota impedance linije in impedance izvora pri frekvenci osnovnega vala, R_c pa je razmerje U^2/P bremena, kjer je U napetost na sponkah in P aktivna moč.



Slika 2.4 : Nivoji harmonikov kot funkcija Z_s/R_c za trifazni regulirani pogon Altivar 66 za spreminjanje obratov brez kompenzacijske dušilke.

Tokovni harmoniki povzročajo dodatne izgube v vseh napravah in opremi, to je v kablih, bremenih in izvorih.

Učinki harmonikov

Porast temperature v kablh

Porast temperature v vodnikih je izražen kot:

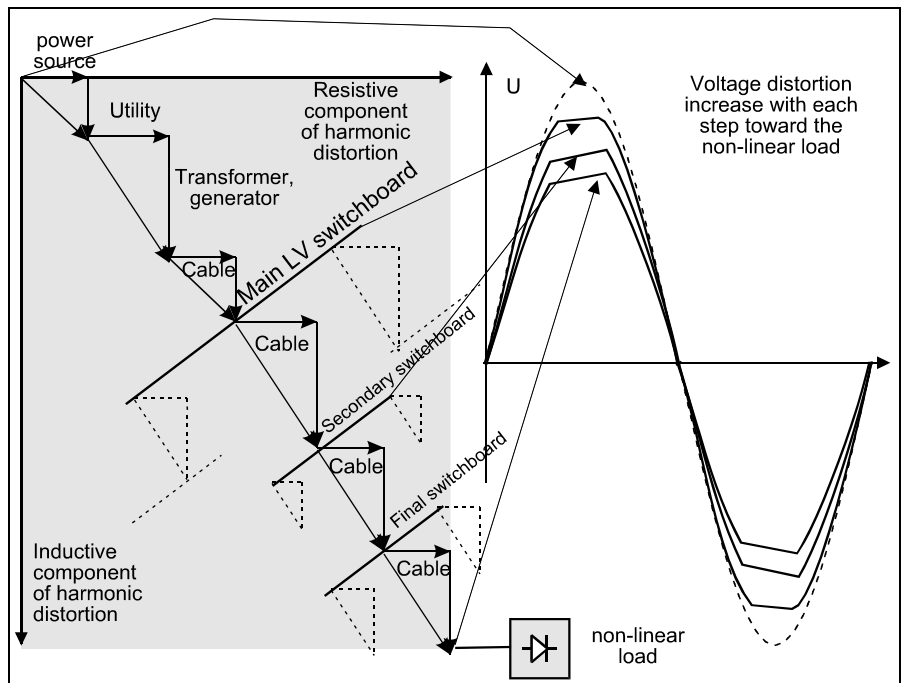
$$Izgube = r \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 R_n^2$$

Porast temperature zaradi harmonskih tokov se prišteva k porastu temperature zaradi izgub pri osnovnem valu.

Onesnažujoča bremena

Tokovna popačitev THDI, ki ga povzročajo bremena, ima za posledico napetostno popačitev THDU, ki ga povzročajo harmonski tokovi in tečejo skozi različne impedance v seriji z izvorom.

Napetostna popačitev je odsev tokovne popačitve in narašča skladno z vsoto impedanc. Slika 2.5 prikazuje različne oblike popačenj v običajni električni inštalaciji.



Slika 2. 5: Učinki harmonikov v inštalaciji.

Rizik preboja kondenzatorja

Velikost kondenzatorskega toka je:

$$I = U C \omega$$

Za harmonski tok n-tega reda je kotna

$$f = 2 \pi n f$$

$$I = 2 \pi n f U C$$

f = osnovna frekvenca

n = red harmonika

torej, tok narašča z redom n.

Zaključek je, da čim več višjih harmonikov vsebuje napetost, tem slabša je situacija za kondenzator.

posledice

- rizik uničenja kondenzatorja.
- rizik resonance zaradi prisotnosti induktivnosti.

- omejitve, ki jih je potrebno upoštevati:

$$\square U_{max} = 1.1 U_n$$

$$\square I_{max} = 1.3 I_n$$

$$\square THDU_{maks.} = 8\%$$

- izbira tipa kondenzatorja: standard, razred h, s harmonskimi dušilkami.

Vpliv na transformatorje

Kombiniranih je več efektov:

- zaradi skin efekta upornost transformatorskih navitij narašča z redom harmonika
- izgube zaradi histereze so proporcionalne s frekvenco.
- izgube zaradi Foucaultovih tokov so proporcionalni s kvadratom frekvence.

Strategije proti harmonikom

posledice

V skladu s standardom NFC 52-114, je potrebno moč transformatorja prilagoditi z uporabo koeficienta k , ki znaša:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{n=2}^{\infty} H_n^2 n^{1,6}}}$$

(izkustvena enačba)

primer

Transformator 1 000 kVA napaja mostični šest pulzni usmernik in povzročata sledeče harmonike:

$H_5 = 25\%$, $H_7 = 14\%$, $H_{11} = 9\%$, $H_{13} = 8\%$.

Koeficient prilagoditve je $k = 0.91$.

Navidezna moč transformatorje je torej 910 kVA.

Splošno rečeno imajo harmoniki za posledico zmanjšanje moči izvora. Čim manjši je močnostni faktor, tem bolj mora biti zmanjšana moč izvora.

Rizik motenja generatorjev

Podobno kot transformatorji tudi generatorji občutijo večje izgube zaradi histereze in Foucaultovih tokov.

■ subtranzientna reaktanca X''_d narašča kot funkcija F .

■ "harmonsko" rotacijsko polje poganja motor pri frekvenci, ki ni enaka frekvenci sinhronizma (50 Hz).

Posledice

■ nastanek parazitskega vrtilnega momenta, kar ima za posledico manjši izkoristek pretvorbe iz mehanske v električno energijo.

■ dodatne izgube v navitjih dušilk in dušenje rotorja.

■ prisotnost vibracij in nenormalen hrup.

Praktično rečeno, tokovni THD v toku generatorja ne sme presegati 20%.

Nad to vrednostjo je potrebno moč generatorja zmanjšati.

Vpliv na sedanje UPS

Ta analiza zadeva samo moderne UPS z visoko frekvenco razsmerjanja (chopping), PWM, in zelo nizko izhodno impedanco (ekvivalentno petkrat močnejšemu transformatorju). Če so UPS izpostavljeni harmonikom, ima to za posledico:

- porast izgub,
- delovanje v načinu tokovnega limitiranja,
- THDU je omejen na <5%

Posledice

UPS naprave so zelo primerne za napajanje nelinearnih porabnikov

Izgube v asinhronskih motorjih

Harmoniki v asinhronskih motorjih povzročajo sledeče učinke:

- porast joulskih izgub in izgub v železu (izgube v statorju);
- pulzirajoč vrtilni moment (izgube v rotorju – zmanjšanje mehanske učinkovitosti).

Za omejitev teh pojavov mora biti THDU manjši od 10%.

Vpliv na ostalo opremo

Harmoniki lahko motijo delovanje ostale opreme kot na primer:

- avtomatske telefonske centrale;
- alarme;
- prožilna vezja, ki ne delujejo na efektivne vrednosti;
- občutljivo elektronsko opremo;
- sisteme daljinskega krmiljenja.

Zaključek

Harmoniki lahko poškodujejo električno inštalacijo in slabo vplivajo na kvaliteto delovanja naprav.

To je vzrok, da mednarodni standardi vedno bolj zahtevajo natančne nivoje kompatibilnosti harmonikov za opremo in postavljajo meje za prisotnost harmonikov v javnih distribucijskih mrežah. Na sledečih straneh so predstavljene različne strategije, ki zadevajo harmonike in uporabnost naprav za aktivno dušenje harmonikov kot SineWave™.

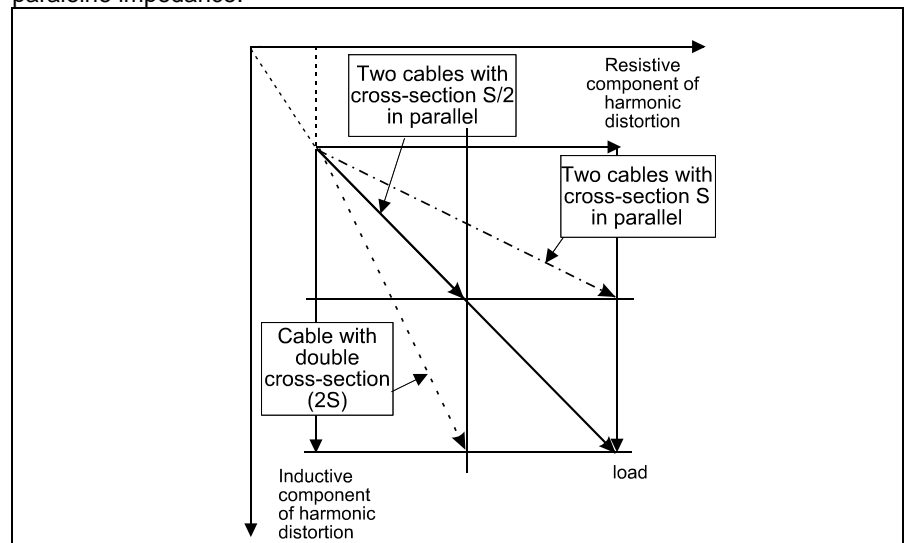
Življenje s harmoniki

Ker negativni učinki harmonskih tokov naraščajo s kumulativno impedanco kablov in izvorov, je očitna rešitev omejevanje totalne impedance, da se tako doseže tako zmanjšanje popačenja napetosti kot tudi porast temperature.

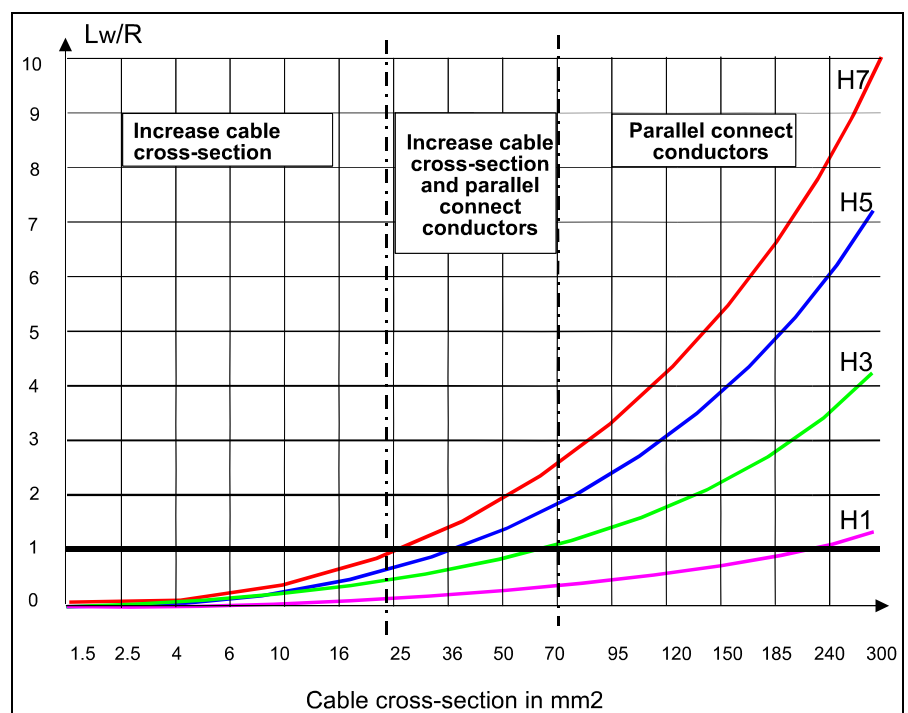
Slika 2.6 prikazuje rezultate, če je presek kabla podvojen.

Glede na dejstvo, da je THDU v prvi vrsti odvisen od induktivne komponente in tako od dolžine kablov, je jasno, da taka rešitev ni zelo učinkovita in ima za posledico samo omejitve porasta temperature.

Slika 2.7 prikazuje, da je za najmočnejše harmonske komponente (H3 do H7), razmerje $L\omega/R$ enako 1 za kable s presekom 36 mm^2 . To pomeni, da je nad 36 mm^2 potrebno zmanjšati impedanco z uporabo pletenih kablov in s tem ustvariti paralelne impedance.



Slika 2.6 : Povečani preseki kablov za zmanjšanje popačenj in izgub.



Slika 2.7 : Vpliv preseka kabla na $L\omega/R$.

Eliminiranje harmonikov

Druga strategija je eliminiranje harmonikov. Obstajata dva glavna tipa rešitev.

Pasivni filtri

LC pasivni filtri so uglašeni na frekvenco, potrebno za eliminiranje ali dušenje določenega frekvenčnega pasu. Harmonski rekombinacijski sistemi (dvojni mostički, fazni premik) se tudi lahko smatajo za del tega sistema. Pasivni filtri imajo dve glavni slabi strani:

- eliminacija harmonikov je učinkovita samo na določeni specifični inštalaciji, to je, dodana ali odvzeta bremena lahko porušijo sistem filtriranja;
- pogosto jih je težko vključiti v obstoječo inštalacijo.

Aktivni filtri

Aktivni filtri, imenovani tudi aktivni harmonski korektorji (conditioners), kot na primer SineWave™, kompenzirajo harmonike z vsiljevanjem (injiciranjem) natančno enakih harmonskih tokov, kjer nastajajo. Ta tip filtrov reagira natančno v realnem času (to je aktivno) k obstoječim harmonikom in jih s tem eliminira. Ti filtri so bolj učinkoviti in fleksibilni kot pasivni filtri in na ta način se izognejo slabim stranem pasivnih filtrov.

Če jih primerjamo s pasivnimi filtri, ta rešitev nudi:

- boljše lastnosti (možna je popolna eliminacija vseh harmonikov do reda 25);
- rešitev je fleksibilna, prilagodljiva (način delovanja je mogoče oblikovati) in jo je mogoče ponovno uporabiti.

Tabela, ki navaja možne strategije proti harmonikom

strategija	prednosti	slabosti
Življenje s harmoniki		
Povečanje nazivne moči izvorov in / ali presekov kablov	Zmanjšanje THDU z zmanjšanjem impedance izvora. Zmanjšanje jouskih izgub.	Inštalacija v obstoječe prostore je težka. To je draga rešitev in je omejena na zmanjševanje uporovne komponente za majhne preseke (induktivna upornost ostane konstantna). Rešitev zahteva paralelne kable velikih presekov. Ne omogoča eliminacijo motenj v smeri proti izvoru. Ni v skladu s standardi.
Posebno napajanje za nelinearna bremena.	Omejuje motnje do sosednjih bremen z odklopom.	Isto kot zgoraj.
Delna eliminacija harmonikov		
Uglašeni harmonski filtri.	Enostavna rešitev.	Samo za en ali dva reda harmonikov. Širokopasovni filtri niso zelo učinkoviti. Obstaja možnost resonance. Potrebno je drago projektiranje.
Dušilke pred nelinearnim bremenom.	Zmanjšanje harmonskih tokov. Omejevanje efekta prehodnih prenapetosti.	Povečanje THDU na priključkih bremen. Zmanjšanje enosmerne napetosti je možno za breme in tudi zmanjšanje moči.
Specialni transformatorji.		Eliminiranje samo določenih redov harmonikov. Nestandardna konstrukcija.
Popolna eliminacija harmonikov		
Aktivni harmonski filtri.		Mogoča je popolna eliminacija vseh harmonikov do reda 25, izvedba je fleksibilna, prilagodljiva (delovanje je mogoče oblikovati) in jo je mogoče ponovno uporabiti.