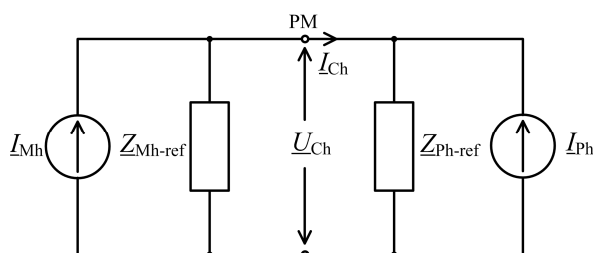


Določanje odgovornosti za harmonsko popačenje v distribucijskem omrežju

I. UVOD

V električnih omrežjih narašča število naprav, ki povzročajo harmonsko popačenje, zato harmoniki ostajajo pomemben dejavnik v okviru kakovosti električne energije. Ker ima lahko harmonsko popačenje različne negativne posledice v omrežju, je potrebno ugotoviti vpliv posameznega porabnika na harmonsko popačenje ter pri tem nameniti ustrezno pozornost tudi resonančnim razmeram, ki prispevajo k ojačitvam posameznih harmonskih komponent. Določanje emisij harmonskega popačenja oziroma odgovornosti za le to, lahko prispeva k zmanjšanju harmonskega popačenja v omrežju. Vendar so obstoječe metode za ugotavljanje odgovornosti za harmonsko popačenje kompleksne in v večini neprimerne za praktično uporabo. Metode, ki temeljijo na stikalnih manevrih problematičnih bremen in ugotavljanju odgovornosti s pomočjo dodatnih elementov (kondenzatorji) so zelo nepraktične in pogosto neizvedljive [1]. Metoda smeri pretoka harmonske moči, ki je bila največkrat uporabljena metoda v industriji [2], je dokazano nezanesljiva in v določenih primerih podaja napačne rezultate [3]. Obstaja več metod, ki temeljijo na Nortonovem ekvivalentnem tokokrogu, kjer so harmonski viri določeni na podlagi podatkov o dejanskih impedancah na strani porabnika in omrežja [4] - [7]. Podatki o impedancah so pogosto nedostopni in težko določljivi, zato so tovrstne metode neprimerne za praktično uporabo, pogosto pa tudi ne podajajo ustreznih rezultatov v primeru posebnih stanj v omrežju (npr. resonančna stanja).



Slika 1: Nortonov ekvivalentni tokokrog pri metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami.

V nadaljevanju je predstavljena metoda harmonskih vektorjev (MHV) z referenčnimi impedancami, ki omogoča določitev odgovornosti za harmonsko popačenje na podlagi meritev na priključnem mestu porabnika na omrežje, pri tem pa ne zahteva poznavanja dejanskih impedanc. Ustreznost metode je bila že dokazana na podlagi simulacij [8, 9], v referatu pa je predstavljena praktična uporabnost metode. Metoda je bila uporabljena v merilnem instrumentu, ki je bil uporabljen za spremljanje vpliva porabnika na harmonsko popačenje. Odgovornost porabnika za harmonsko popačenje na priključnem mestu je bila spremljana v obdobju enega tedna.

II. METODA HARMONSKIH VEKTORJEV Z REFERENČNIMI IMPEDANCAMI

Metodo harmonskih vektorjev uvrščamo med metode, ki določajo deleže harmonskega popačenja na podlagi meritev v eni točki omrežja. Metode z merjenjem v eni točki omrežja so primerne predvsem za ugotavljanje prispevkov k harmonskemu popačenju enega porabnika glede na celotno ostalo omrežje. Osnovna metoda harmonskih vektorjev temelji na Nortonovem teoremu, kjer točko priključitve porabnika na omrežje predstavimo z Nortonovim ekvivalentnim tokokrogom [7]. Metoda razdeli posamezno harmonsko komponento toka ali napetosti na priključnem mestu (PM) oziroma točki priključitve porabnika na omrežje, v komponento porabnika in komponento dobavitelja oziroma omrežja. Izračun odgovornosti za harmonsko popačenje na PM temelji na predpostavki, da so impedance na strani porabnika oziroma omrežja znane, kar pa v praksi največkrat ne velja. Podatki o impedancah in impedančnih frekvenčnih karakteristikah, predvsem na strani porabnika, običajno niso znani in jih je težko pridobiti, prav tako se impedance spreminjajo glede obremenitev. Potrebno poznavanje impedanc predstavlja največjo pomanjkljivost metode, ki tudi ne omogoča pravilnega ovrednotenja odgovornosti za harmonsko popačenje v resonančnih stanjih. Rešitev tovrstnih težav se je pokazala v uporabi referenčnih impedanc. Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami temelji na Nortonovem oziroma Theveninovem ekvivalentnem tokokrogu, kjer so dejanske impedance nadomeščene z referenčnimi impedancami. Pri izračunu odgovornosti za harmonsko popačenje toka izhajamo iz Nortonovega ekvivalentnega tokokroga (slika 1).

Nortonov ekvivalentni tokokrog je sestavljen iz porabniškega tokovnega vira harmonskega popačenja \underline{I}_{ph} , tokovnega harmonskega vira na strani omrežja \underline{I}_{Mh} ter referenčnih impedanc porabnika \underline{Z}_{Ph-ref} oziroma dobavitelja \underline{Z}_{Mh-ref} . Indeksi, uporabljeni na sliki 1 so M za dobavitelja oziroma omrežje, P za porabnika oziroma odjemalca in C za točko merjenja oziroma izmerjene veličine na PM. Ekvivalentni tokokrog velja za različne harmonske frekvence, pri čemer se spremeni le vrednost harmonskega reda h .

Določanje prispevkov posamezne strani k harmonskemu popačenju na PM temelji na meritvi toka in napetosti v točki priključitve opazovanega porabnika na omrežje. Pri tem poleg amplitude merimo tudi fazni kot med izmerjenim tokom \underline{I}_{Ch} in izmerjeno napetostjo \underline{U}_{Ch} . V fazi predstavitve metode predpostavimo, da so referenčne impedance porabnika in dobavitelja oziroma omrežja znane. Glede na sliko 1 sta izmerjena harmonski tok \underline{I}_{Ch} in harmonska napetost \underline{U}_{Ch} na PM odvisna od toka harmonskega vira na strani omrežja \underline{I}_{Mh} in toka harmonskega vira na strani porabnika \underline{I}_{Ph} . Tokovna harmonska vira na obeh straneh lahko izračunamo iz izmerjenih vrednosti \underline{I}_{Ch} in \underline{U}_{Ch} na PM:

$$\underline{I}_{Mh} = \frac{\underline{U}_{Ch}}{\underline{Z}_{Mh-ref}} + \underline{I}_{Ch}, \quad (1)$$

$$\underline{I}_{Ph} = \frac{\underline{U}_{Ch}}{\underline{Z}_{Ph-ref}} - \underline{I}_{Ch}. \quad (2)$$

V skladu s principom superpozicije je tok \underline{I}_{Ch} vsota posameznih prispevkov vseh virov v omrežju. Na podlagi principa superpozicije lahko izračunamo harmonska tokova, ki tečeta skozi priključno mesto zaradi omrežja \underline{I}_{M-Ch} in porabnika \underline{I}_{P-Ch} . Princip superpozicije sicer ne velja za nelinearne sisteme, kar harmonski viri prav gotovo so, vendar v primeru metode harmonskih vektorjev s superpozicijo ne določamo virov harmonskega popačenja, ampak le prispevke posameznih harmonskih virov. V primeru, da harmonske vire poznamo (npr. na podlagi meritev), je uporaba metode superpozicije za določanje prispevkov harmonskih virov utemeljena [10]. Harmonski tok zaradi omrežja \underline{I}_{M-Ch} in harmonski tok zaradi porabnika \underline{I}_{P-Ch} sta določena s (3) oziroma (4).

$$\underline{I}_{M-Ch} = \frac{\underline{Z}_{Mh-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{I}_{Mh} \quad (3)$$

$$\underline{I}_{P-Ch} = -\frac{\underline{Z}_{Ph-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{I}_{Ph} \quad (4)$$

Absolutno vrednost izmerjenega harmonskega toka na priključnem mestu \underline{I}_{Ch} lahko nadalje razstavimo na skalarni prispevek omrežja in porabnika kot prikazuje slika 2. Skalarni prispevek omrežja I_{Mhf} k harmonskemu toku \underline{I}_{Ch} dobimo tako, da fazor harmonskega toka zaradi omrežja \underline{I}_{M-Ch} projiciramo na fazor izmerjenega harmonskega toka na PM (\underline{I}_{Ch}).

Podobno določimo tudi skalarni prispevek porabnika I_{Phf} , le da sedaj na fazor izmerjenega toka \underline{I}_{Ch} projiciramo fazor harmonskega toka zaradi porabnika \underline{I}_{P-Ch} . Skalarna prispevka izračunamo s pomočjo enačb (5) in (6):

$$I_{Mhf} = |\underline{I}_{M-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{\underline{I}_{M-Ch}} - \varphi_{\underline{I}_{Ch}}), \quad (5)$$

$$I_{Phf} = |\underline{I}_{P-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{\underline{I}_{P-Ch}} - \varphi_{\underline{I}_{Ch}}), \quad (6)$$

pri čimer so $\varphi_{\underline{I}_{M-Ch}}$ fazni kot harmonskega toka zaradi omrežja \underline{I}_{M-Ch} , $\varphi_{\underline{I}_{P-Ch}}$ fazni kot harmonskega toka zaradi porabnika \underline{I}_{P-Ch} in $\varphi_{\underline{I}_{Ch}}$ fazni kot izmerjenega harmonskega toka na PM \underline{I}_{Ch} . Obe komponenti sta skalarni vrednosti in imata lahko nasprotni predznake. Če imata enak predznak se seštevata v obliko $|\underline{I}_{Ch}|$, v primeru nasprotnih predznakov, pa ima prispevek z negativnim predznakom učinek zmanjševanja oziroma kompenzacije harmonskega toka v točki priključitve porabnika na omrežje.

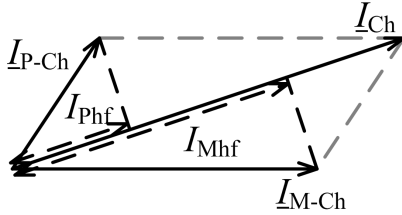
Poleg računanja prispevkov dobavitelja in porabnika k harmonskemu toku \underline{I}_{Ch} , nas običajno zanima tudi njun prispevek k harmonski napetosti \underline{U}_{Ch} . Pri računanju prispevkov k napetostnemu popačenju na priključnem mestu izhajamo iz Theveninovega ekvivalentnega tokokroga (slika 3), kjer sta omrežje in porabnik ponazorjena z napetostnima harmonskima viroma \underline{U}_{Mh} in \underline{U}_{Ph} ter pripadajočima referenčnima impedancama \underline{Z}_{Mh-ref} in \underline{Z}_{Ph-ref} pri harmonskem redu h .

Napetostna harmonska vira na obeh straneh lahko izračunamo iz izmerjenih vrednosti \underline{I}_{Ch} in \underline{U}_{Ch} na PM:

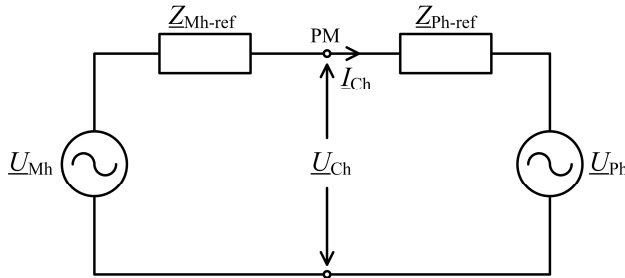
$$\underline{U}_{Mh} = \underline{U}_{Ch} + \underline{I}_{Ch} \cdot \underline{Z}_{Mh-ref} \quad (7)$$

$$\underline{U}_{Ph} = \underline{U}_{Ch} - \underline{I}_{Ch} \cdot \underline{Z}_{Ph-ref} \quad (8)$$

Tudi v tem primeru uporabimo princip superpozicije, kjer razdelimo Theveninov ekvivalentni tokokrog in določimo harmonsko napetost, ki je posledica prisotnosti porabnika oziroma omrežja. Na podlagi enačb (9) in (10) izračunamo harmonski napetosti na PM zaradi omrežja \underline{U}_{M-Ch} oziroma porabnika \underline{U}_{P-Ch} .



Slika 2: Prispevki porabnika in omrežja k harmonskemu popačenju toka na priključnem mestu porabnika.



Slika 3: Theveninov ekvivalentni tokokrog pri računanju prispevkov k napetostnem harmonskemu popačenju.

$$\underline{U}_{M-Ch} = \frac{\underline{Z}_{Ph-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{U}_{Mh} \quad (9)$$

$$\underline{U}_{P-Ch} = \frac{\underline{Z}_{Mh-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{U}_{Ph} \quad (10)$$

Skalarne prispevke omrežja in porabnika k harmonskemu popačenju napetosti na PM dobimo na podoben način kot v primeru tokovnega harmonskega popačenja (slika 2). Skalarni prispevek omrežja U_{Mhf} k izmerjeni harmonski napetosti \underline{U}_{Ch} na PM izračunamo z (11), ki predstavlja projekcijo fazorja harmonske napetosti zaradi omrežja \underline{U}_{M-Ch} , na fazor izmerjene harmonske napetosti \underline{U}_{Ch} . Na podoben način določimo tudi prispevek porabnika U_{Phf} , ki ga podaja (12).

$$U_{Mhf} = |\underline{U}_{M-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{U_{M-Ch}} - \varphi_{U_{Ch}}) \quad (11)$$

$$U_{Phf} = |\underline{U}_{P-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{U_{P-Ch}} - \varphi_{U_{Ch}}) \quad (12)$$

Tudi tukaj je pri izračunu uporabljen fazni kot harmonske napetosti zaradi omrežja $\varphi_{U_{M-Ch}}$, fazni kot harmonske napetosti zaradi porabnika $\varphi_{U_{P-Ch}}$ in fazni kot izmerjene harmonske napetosti na priključnem mestu $\varphi_{U_{Ch}}$. Tudi v tem primeru velja podobno kot pri toku, da sta obe komponenti skalarni vrednosti, ki imata lahko nasprotni predznaki, pri čimer negativni predznak pomeni kompenzacijo določenega napetostnega harmonika na PM.

III. REFERENČNE IMPEDANCE

Izhodišče metode harmonskih vektorjev z upoštevanjem referenčnih impedanc je, da se vsaka sprememba oziroma odstopanje dejanske impedance od referenčne vrednosti pretvori v dodaten ekvivalentni harmonski vir.

V realnosti se spreminjata impedanci tako na strani omrežja kot na strani porabnika. Medtem ko je impedanca na strani omrežja običajno možno določiti, so podatki o impedancah na porabniški strani redko dostopni. Ker so običajno industrijski porabniki, javne zgradbe in podobni večji porabniki, ki so hkrati tudi največji vir harmonskega popačenja, napajani preko lastnega transformatorja, je na strani omrežja impedanca v največji meri določena z impedanco tega transformatorja. Impedanca napajalnega transformatorja predstavlja več kot 90 % vrednosti impedance omrežja. Za referenčno impedanco na strani omrežja je tako predlagana impedanca napajalnega transformatorja, ki ji prištejemo še kratkostično impedanco omrežja.

Na strani porabnika so referenčne impedance določene na podlagi meritev na PM. Pri tem izhajamo iz obstoječe prakse o zahtevanem faktorju moči, kjer naj bi imel porabnik ohmski karakter ($\cos\varphi=1$) pri osnovni frekvenci. Pri metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami je predlagano, da se obstoječa praksa razširi na vse harmonske frekvence, kar pomeni, da je želen ohmski karakter porabnika ne samo pri osnovni frekvenci, ampak tudi pri vseh harmonskih frekvencah. Za referenčno impedanco na strani porabnika je tako predlagana ohmska komponenta bremena porabnika. Pri tem je možno upoštevati tudi frekvenčno odvisnost ohmske komponente zaradi kožnega pojava (ang. skin effect), ki pa jo v nadaljevanju zanemarimo. Določanje referenčne impedance porabnika je odvisno ali ugotovljamo odgovornost za tokovno ali napetostno harmonsko popačenje. Pri tem je predpostavljeno, da na strani porabnika ni generacije delovne moči.

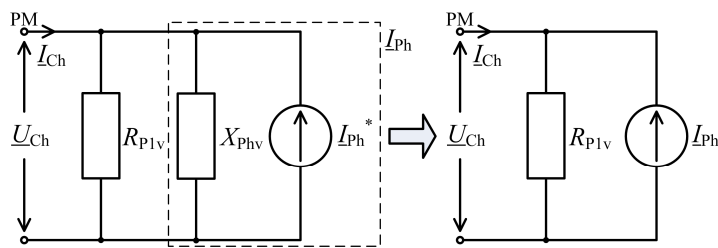
A. Odgovornost za tokovno harmonsko popačenje

V primeru določanja prispevkov k tokovnemu harmonskemu popačenju je impedanca porabnika predstavljena kot vzporedna vezava ohmske upornosti in reaktance (slika 4). Ker je referenčna impedanca porabnika enaka ohmski upornosti, se tok skozi reaktanco pretvori v ekvivalentni dodatni tokovni harmonski vir.

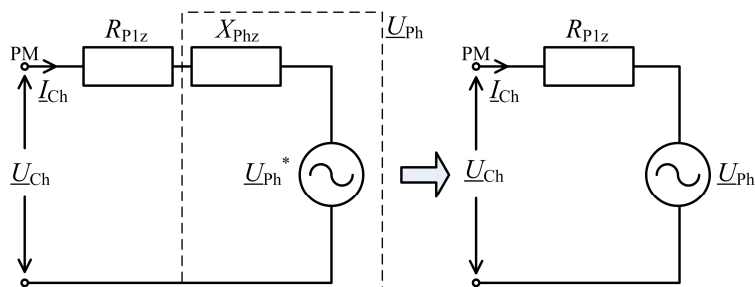
Ob predpostavki, da porabnik nima generacije delovne moči, izračunamo referenčno impedanco porabnika na podlagi izmerjene delovne moči pri osnovni frekvenci P_1 in izmerjene napetosti na priključnem mestu.

$$\underline{Z}_{\text{Ph-ref}} = R_{\text{P1v}} = \frac{|\underline{U}_{\text{C1}}|^2}{P_1} = \frac{|\underline{U}_{\text{C1}}|}{|\underline{I}_{\text{C1}}| \cdot \cos\varphi_{\text{C1}}} \quad (13)$$

V enačbi (13) predstavlja φ_{C1} fazni kot med osnovno harmonsko komponento toka $\underline{I}_{\text{C1}}$ in osnovno harmonsko komponento napetosti $\underline{U}_{\text{C1}}$. Ob znanih oziroma določenih referenčnih impedancah na strani porabnika in dobavitelja, je postopek izračuna odgovornosti oziroma prispevkov k tokovnemu popačenju določen z enačbami (1)-(6).



Slika 4: Tok skozi reaktanco se pretvori v dodaten tokovni harmonski vir.



Slika 5: Padeč napetosti na reaktanci se pretvori v dodaten napetostni harmonski vir.

B. Odgovornost za napetostno harmonsko popačenje

Pri določanju prispevkov k harmonskemu popačenju napetosti je porabnik predstavljen z zaporedno vezavo ohmske upornosti in reaktance. Ker je referenčna impedanca porabnika enaka ohmski komponenti, je padec napetosti na reaktanci pretvorjen v ekvivalentni dodatni napetostni harmonski vir (slika 5).

Ob enakih predpostavkah kot v primeru tokovnega harmonskega popačenja je referenčna impedanca porabnika izračunana na podlagi izmerjenega toka osnovne frekvence in izmerjene delovne moči pri osnovni frekvenci P_1 .

$$\underline{Z}_{\text{Ph-ref}}^* = R_{\text{Plz}} = \frac{P_1}{|\underline{I}_{C1}|^2} = \frac{|\underline{U}_{C1}| \cdot \cos \varphi_{C1}}{|\underline{I}_{C1}|} \quad (14)$$

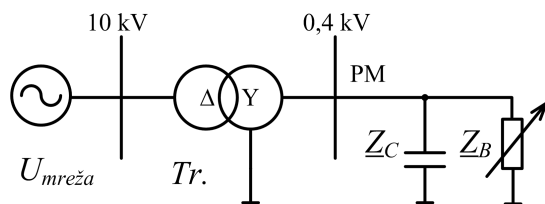
Ob znanih referenčnih impedancah, je postopek izračuna prispevkov k harmonskemu popačenju napetosti opisan z enačbami (6)-(12).

IV. PRAKTIČNA UPORABA MHV Z REFERENČNIMI IMPEDANCAMI

Metoda je bila v praksi uporabljena pri meritvah harmonskega popačenja oziroma pri spremljanju odgovornosti za harmonsko popačenje na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Enopolna shema obravnavanega omrežja na fakulteti je prikazana na sliki 6.

Fakulteta za elektrotehniko je v razdelilno omrežje priključena prek transformatorja 10/0,4 kV, vezave trikot/zvezda (Δ/Y) (TP Stara). Nazivna moč transformatorja je 0,4 MVA in kratkostična napetost 4,9 %. Za transformator je privzeto razmerje med ohmsko in induktivno upornostjo $(R/X)_{\text{Tr}} = 0,2$. V TP Stara je na nizkonapetostni strani (0,4 kV) vgrajen kompenzator jalove energije moči $Q_C = 40$ kVAr, $(R/X)_C = 0,01$. Kratkostična moč toge mreže S_k je bila ocenjena na vrednost 50 MVA pri $(R/X)_{\text{TM}} = 0,1$.

Meritve so bile opravljene na sekundarni strani transformatorja v TP Stara. V primeru [8] je bilo ugotovljeno, da na podlagi kratkotrajnih meritev ni smiselno ugotavljati odgovornosti za harmonsko popačenje, saj ne zajamemo vseh sprememb v napajalnem in porabniškem omrežju. Iz tega razloga so bile izvedene meritve v daljšem časovnem obdobju. Izvedene so bile tedenske, desetminutne meritve v obdobju med 31. marcem in 7. aprilom 2008, in sicer z merilnim instrumentom Dewetron. V merilni instrument je bila na podlagi matematičnega modula v programskem okolju DEWESoft implementirana metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami.



Slika 6: Enopolna shema omrežja na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani – TP Stara.

Za analizo je bila izbrana 5. harmonska komponenta, ki je zaradi narave bremen (na primer računalnikov in razsvetljave) v električnem omrežju fakultete najbolj zastopana. V referatu so podani le rezultati odgovornosti za napetostno harmonsko popačenje. Ker se harmonsko popačenje v posameznih fazah ne razlikuje preveč, je obravnavano harmonsko popačenje oziroma 5. harmonska komponenta samo v fazi L1.

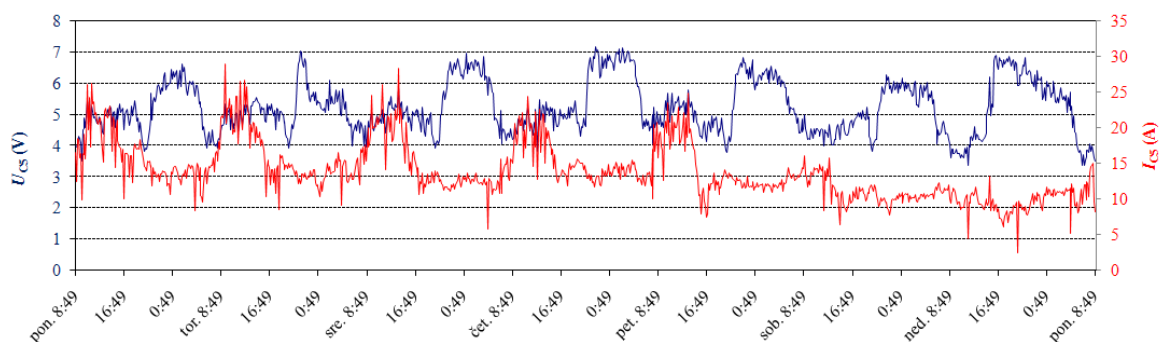
Meritve so bile opravljene na podlagi samodejnega desetminutnega proženja pri vzorčenju 10000 Hz/kanal. FFT-modul, znotraj modula DEWESoft Power, za Fourierovo transformacijo uporablja okno dolžine desetih period, torej je bilo vsakih deset minut posnetih deset period toka in napetosti vseh treh faz (meritev je trajala 0,2 s). V primeru [8] je bilo ugotovljeno, da se znotraj kratkotrajnih časovnih intervalov harmonsko popačenje ne spreminja preveč oziroma obstajajo kvazi-stacionarna stanja. Prav tako je znotraj kratkih časovnih intervalov razmeroma konstanten tudi fazni kot med napetostjo in tokom. Grafični prikaz izmerjene efektivne 5. harmonske komponente napetosti in toka na PM za celotno merilno obdobje je na sliki 7.

Peta harmonska komponenta napetosti je med delovnim dnevom razmeroma konstantna in naraste v večernih urah, kar je posledica razmer v SN razdelilnem omrežju. Povečanje 5. harmonske komponente napetosti v tem primeru ni povzročeno s strani fakultete, na kateri v tem času potekajo manjše aktivnosti, kar se odraža tudi na zmanjšani 5. harmonski komponenti toka. Tokovno popačenje 5. reda začne upadati v popoldanskem času, ko je konec delovnega dne, vendar kljub temu ostane na razmeroma visoki ravni. To je predvsem posledica tega, da mnogo bremen, kot na primer računalnikov, razsvetljave ipd., ostane vklopljenih tudi po končanem delovnem dnevu. Ob zmanjšani 5. harmonski komponenti toka porabnik ne more biti odgovoren za porast napetostnega

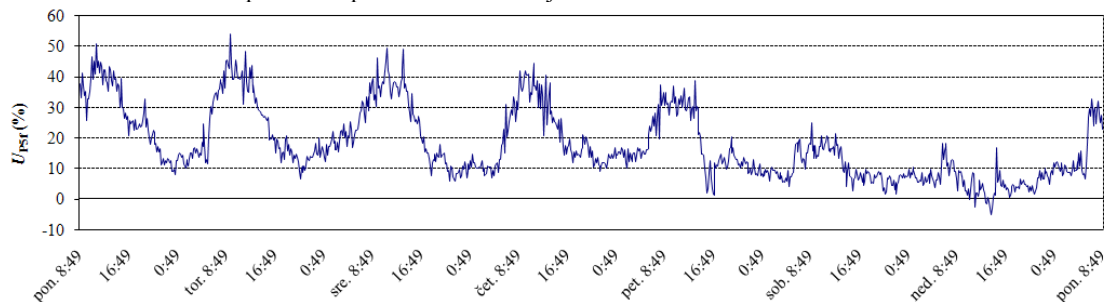
harmonika 5. reda. Podobno raven 5. harmonske komponente toka je mogoče opaziti tudi v soboto in nedeljo, zato je spremembe napetostnega popačenja 5. reda mogoče pripisati predvsem dobavitelju oziroma omrežju. Na podlagi analize meritev v omrežju Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani ni bilo opaziti kakršnihkoli ojačenj harmonikov, ki bi bile posledica resonančnih stanj.

Odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti, izračunana po MHV z referenčnimi impedancami je prikazana na sliki 8. Navedene so vrednosti v odstotkih, izračunane glede na absolutno vrednost izmerjene 5. harmonske komponente napetosti v TP Stara (U_{C5}).

Povečana odgovornost porabnika se kaže predvsem med tednom med delovnimi urami, ko se zaradi narave bremen na fakulteti poveča tudi 5. harmonska komponenta toka. Med zmanjšano obremenitvijo na fakulteti odgovornost porabnika za napetostno popačenje upade. Za povečano 5. harmonsko komponento napetosti v večernem in nočnem času je tako odgovoren dobavitelj oziroma omrežna stran. Rezultat je smiseln, saj porabnik nima vpliva na spremembe harmonskega popačenja, ki so posledica razmer v SN omrežju. Podobno lahko ugotovimo tudi v primeru dela prostih dni (na primer nedelj), ko je fakulteta zaprta in je obremenitev posledično manjša.



Slika 7: 5. harmonska komponenta napetosti in toka izmerjena v TP Stara.



Slika 8: Odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti na PM (TP Stara).

V. SKLEP

Predstavljena je bila metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami, s katero je mogoče določiti odgovornost za harmonsko popačenje v točki priključitve posameznega porabnika v omrežje. Metoda temelji na uporabi referenčnih impedanc in ne zahteva poznavanja dejanskih impedanc. Referenčne impedance porabnika so določene na podlagi meritev toka in napetosti na priključnem mestu. Metoda je primerna za praktično uporabo in je bila uporabljena v merilnem instrumentu za spremljanje odgovornosti za harmonsko popačenje v realnem času. Predstavljene so bile tedenske desetminutne meritve odgovornosti za harmonsko popačenje. Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami podaja smiselne rezultate in pravilno ovrednoti odgovornost za harmonsko popačenje v primeru sprememb tako na strani porabnika kot na strani omrežja.

Pri reševanju problematike harmonskega popačenja in posledično slabe kakovosti električne energije bi bilo ugotavljanje odgovornosti oziroma prispevkov, ki jih k skupnemu harmonskemu popačenju prispevata tako omrežje kot posamezni porabnik, potrebno in zaželeno. Pri tem je pomembno pravilno ovrednotiti tudi ojačenje harmonskega popačenja, ki je posledica resonančnih stanj in jih je treba v omrežju preprečiti. Finančno ovrednotenje prispevkov k harmonskemu popačenju je eden izmed načinov, ki bi porabnike oziroma dobavitelje spodbudilo k reševanju potencialnih težav s harmonskim popačenjem. Vsekakor je treba pri tovrstnem načinu reševanja problematike harmonskega popačenja prvotno pravilno in pravično določiti deleže odgovornosti, pri čimer se je metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami izkazala kot dobra rešitev.

VI. REFERENCE

- [1] "Review of methods for measurement and evaluation of harmonic emission level from an individual distorting load," in CIGRE, CIGRE 36.05/ CIRE 2 Joint WG CC02 (Voltage Quality), Jan. 1999.
- [2] L. Cristaldi and A. Ferrero, "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, pp. 683–685, June 1995.
- [3] W. Xu, X. Liu, Y. Liu, "An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 18, pp. 214-219, Jan. 2003.
- [4] M. Tsukamoto, I. Kouda, Y. Natsuda, Y. Minowa, and S. Nishimura, "Advanced method to identify harmonic characteristic between utility grid and harmonic current sources," in Proc. 8th Int. Conf. Harmonics Quality Power, Athens, Greece, Oct. 1998, pp. 419–425.
- [5] H. Yang, P. Pirotte, and A. Robert, "Assessing the harmonic emission level from one particular customer," in Proc. 3rd Int. Conf. Power Quality: End-Use Applicat. Perspectives, Amsterdam, The Netherlands, 1994, B-2.08.
- [6] C. Li, W. Xu, T. Tayjasanant, "A Critical Impedance Based Method for Identifying Harmonic Sources," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, April 2004.
- [7] W. Xu, Y. Liu, "A method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the point of Common Coupling," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, pp. 804-811, Apr. 2000.
- [8] T. Pfažfar, B. Blažič, I. Papič, "Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 23, pp. 425-433, Jan. 2008.
- [9] T. Pfažfar, B. Blažič, I. Papič, "Managing the responsibility for harmonic distortion in power networks," Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 2538-2545, oktober 2008.
- [10] C. Li, W. Xu, "On Defining Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling," IEEE Power Engineering Review, July 2002.