

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Tomaž Pfajfar

DOLOČANJE ODGOVORNOSTI ZA HARMONSKO  
POPAČENJE Z REFERENČNIMI IMPEDANCAMI

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana 2009



UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Tomaž Pfajfar

DOLOČANJE ODGOVORNOSTI ZA HARMONSKO  
POPAČENJE Z REFERENČNIMI IMPEDANCAMI

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: Prof. dr. Igor Papič, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana 2009



## ZAHVALA

Posebna zahvala je namenjena mentorju prof. dr. Igorju Papiču, ki me spremlja in skrbi za moj napredek že od diplomiranja naprej. Bilo mi je v čast delovati pod njegovim mentorstvom, saj mi je omogočil velik napredek, mi ves čas stal ob strani, me usmerjal in vodil do končnega cilja. Hvala za vso podporo in korekten odnos.

Iskreno se zahvaljujem tudi prof. dr. Petru Žunku za vse njegove vzpodbudne besede, ki so vedno našle pravo mesto.

Hvala tudi sodelavcu Boštjanu Blažiču, ki mi je nesebično pomagal in me na podlagi izkušenj usmerjal ter veliko prispeval h končnemu uspehu.

Poleg tega je zahvala namenjena tudi Mateju Kobavu, Urošu Kerinu, Ambrožu Božičku in vsem drugim sodelavcem, zaradi katerih je delovno vzdušje vedno ustvarjalno, sestanki ob kavici pa veseli.

Hvaležen sem tudi fantom na raziskovalnem inštitutu Arsenal Research, ki so med mojim gostovanjem na Dunaju skrbeli, da mi ni manjkalo niti dela niti zabave.

Zahvaljujem se tudi vsem prijateljem za pomoč in nasvete ter trenutke, ko so znali prisluhniti. Hvala!

Še posebej hvala mojim domačim, mami, očetu, bratu in njegovi družini za vso pomoč in podporo, ki so mi jo nudili med študijem in mi tako omogočili uresničitev zelenega cilja.

Med nastajanjem tega dela je v moje življenje vstopila še moja Marloes, mi prinesla novo energijo, dnevi zaradi nje pa so mnogo lepši! Dank u wel Marloes!



**KAZALO**

<b>SEZNAM SIMBOLOV .....</b>	<b>1</b>
<b>POVZETEK.....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>11</b>
<b>UVOD .....</b>	<b>15</b>
Problematika in cilji doktorske naloge .....	16
Prispevki k znanosti.....	17
Seznam publikacij .....	18
<b>1 HARMONSKO POPAČENJE .....</b>	<b>21</b>
1.1 Fourierova vrsta.....	21
1.2 Harmoniki v trifaznem sistemu .....	23
1.3 Električne veličine v harmonsko popačenem sistemu.....	25
1.3.1 Delovna, jalova in navidezna moč.....	25
1.3.2 Faktor moči .....	27
1.3.3 Kratkostična moč.....	28
1.3.4 Nazivna moč naprav.....	28
1.4 Vrednotenje harmonskega popačenja.....	29
1.4.1 Relativne harmonske vrednosti.....	29
1.4.2 Skupno harmonsko popačenje .....	30
1.5 Viri harmonskega popačenja .....	31
1.5.1 Komercialna bremena .....	32
1.5.2 Industrijska bremena.....	34
1.6 Odziv omrežja na harmonsko popačenje.....	37
1.6.1 Impedančne frekvenčne karakteristike opazovane s strani omrežja.....	37
1.6.2 Impedančne frekvenčne karakteristike opazovane s strani porabnika.....	39
1.7 Vpliv harmonskega popačenja.....	41
1.8 Odpravljanje harmonskega popačenja.....	42
1.9 Standardi na področju harmonskega popačenja .....	44
1.9.1 SIST EN 50160 .....	45
1.9.2 IEC 61000-3-6.....	45
<b>2 DOLOČANJE ODGOVORNOSTI ZA HARMONSKO POPAČENJE.....</b>	<b>47</b>
2.1 Osnovna metoda harmonskih vektorjev .....	48

---

2.2	Metoda harmonskih vektorjev z uporabo referenčnih impedanc.....	49
2.2.1	Referenčne impedance.....	55
2.2.1.1	Odgovornost za tokovno harmonsko popačenje.....	57
2.2.1.2	Odgovornost za napetostno harmonsko popačenje.....	58
2.3	Metoda po IEC 61000-3-6.....	58
<b>3</b>	<b>PREIZKUS METODE HARMONSKIH VEKTORJEV Z REFERENČNIMI IMPEDANCAMI NA PREPROSTEM MODELU OMREŽJA.....</b>	<b>63</b>
3.1	Harmonski vir samo na strani omrežja.....	64
3.1.1	Vpliv spremembe impedance omrežja in harmonskega vira.....	64
3.1.2	Vpliv spremembe bremena porabnika.....	67
3.1.2.1	Sprememba R-L bremena porabnika.....	68
3.1.2.2	Sprememba R-L bremena porabnika pri vključenem kondenzatorju.....	72
3.2	Harmonski vir samo na strani porabnika.....	81
3.2.1	Vpliv spremembe linearnega bremena in harmonskega vira.....	81
3.2.2	Vpliv spremembe impedance omrežja.....	83
3.3	Harmonski vir na strani porabnika in omrežja.....	86
3.3.1	Vpliv spremembe harmonskega vira na strani porabnika.....	86
<b>4</b>	<b>PRIMERJAVA IN PRAKTIČNA UPORABA METOD ZA DOLOČANJE ODGOVORNOSTI ZA HARMONSKO POPAČENJE.....</b>	<b>91</b>
4.1	Primerjava metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje na preprostem modelu omrežja.....	91
4.1.1	Primerjava metod - harmonski vir na strani porabnika in omrežja.....	92
4.1.2	Primerjava metod – resonančne razmere.....	95
4.2	Praktična uporaba in primerjava metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje.....	98
4.2.1	Harmonsko popačenje napetosti.....	103
4.2.2	Harmonsko popačenje toka.....	107
	<b>SKLEPNE UGOTOVITVE.....</b>	<b>113</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>117</b>
	<b>IZJAVA O AVTORSTVU DOKTORSKE DISERTACIJE.....</b>	<b>121</b>
	<b>PRILOGE.....</b>	<b>123</b>
	Preizkus metod na modelu omrežja v programskem okolju MATLAB.....	123

---



---

**SEZNAM SIMBOLOV****Simboli, rabljeni v prvem poglavju**

$VN$	visoka napetost
$SN$	srednja napetost
$NN$	nizka napetost
$f$	frekvenca
$t$	čas
$\omega$	kotna hitrost
$T$	perioda signala
$h$	red harmonika oziroma mnogokratnik osnovne harmonske frekvence (50 Hz)
$h_{\text{maks}}$	maksimalni red harmonika
$a_0$	enosmerna komponenta v Fourierovi vrsti
$a_h$	koeficient Fourierove vrste
$b_h$	koeficient Fourierove vrste
$A_0$	enosmerna komponenta v Fourierovi vrsti
$A_h$	amplituda $h$ -te harmonske komponente v Fourierovi vrsti
$\theta_h$	fazni kot $h$ -te harmonske komponente v Fourierovi vrsti
$U_{\text{ef}}$	efektivna vrednost napetosti
$I_{\text{ef}}$	efektivna vrednost toka
$U_1$	efektivna vrednost osnovne harmonske komponente napetosti
$U_h$	efektivna vrednost napetosti $h$ -tega harmonskega reda
$u_h$	relativna vrednost harmonske napetosti $h$ -tega reda
$I_1$	efektivna vrednost osnovne harmonske komponente toka
$I_h$	efektivna vrednost toka $h$ -tega harmonskega reda
$i_h$	relativna vrednost harmonskega toka $h$ -tega reda
$S$	absolutna vrednost navidezne moči
$S_1$	osnovna harmonska komponenta navidezne moči
$P$	delovna moč
$P_1$	osnovna harmonska komponenta delovne moči
$Q$	jalova moč
$D$	moč popačenja
$DPF$	premaknjen faktor moči

---

$TPF$	pravi faktor moči
$HPF$	harmonsko prilagojen faktor moči
$K_h$	utežni faktorji za merjene toke zaradi harmonskega popačenja
$S_K''$	kratkostična moč v določeni točki omrežja
$U_n$	nazivna napetost
$\underline{Z}$	impedanca
$U_f$	fazna napetost
$U_{mf}$	medfazna napetost
$I_n$	nazivni tok
$S_n$	nazivna navidezna moč
$I_{n\text{maks}}$	maksimalna efektivna vrednost toka v kateri koli fazi
$THD$	skupno harmonsko popačenje
$THD_I$	skupno harmonsko popačenje toka
$THD_U$	skupno harmonsko popačenje napetosti
$TDD$	skupno harmonsko popačenje glede na maksimalni bremenski tok
$I_L$	osnovna harmonska komponenta maksimalnega toka bremena
$PWM$	pulzno širinska modulacija
$\underline{Z}_{Ser}$	nadomestna impedanca pri serijski resonanci
$\underline{Z}_{Par}$	nadomestna impedanca pri paralelni resonanci
$\underline{Z}_{TM}$	impedanca toge mreže
$\underline{Z}_{TR}$	impedanca transformatorja
$\underline{Z}_B$	impedanca bremena
$\underline{Z}_C$	impedanca kompenzatorja jalove energije

### **Simboli, dodatno rabljeni v drugem poglavju**

$PM$	priključno mesto
$MHV$	metoda harmonskih vektorjev
$\underline{U}_{Ch}$	harmonska napetost $h$ -tega reda na priključnem mestu
$\underline{I}_{Ch}$	harmonski tok $h$ -tega reda na priključnem mestu
$\underline{I}_{Mh}$	harmonski tok $h$ -tega reda vira na strani dobavitelja
$\underline{I}_{Ph}$	harmonski tok $h$ -tega reda vira na strani porabnika
$\underline{Z}_{Mh}$	harmonska impedanca $h$ -tega reda na strani dobavitelja

---

$\underline{Z}_{Ph}$	harmonska impedanca $h$ -tega reda na strani porabnika
$\underline{Z}_{Mh-ref}$	referenčna harmonska impedanca $h$ -tega reda na strani dobavitelja
$\underline{Z}_{Ph-ref}$	referenčna harmonska impedanca $h$ -tega reda na strani porabnika
$\underline{I}_{M-Ch}$	harmonski tok $h$ -tega reda v točki priklopa zaradi dobavitelja
$\underline{I}_{P-Ch}$	harmonski tok $h$ -tega reda v točki priklopa zaradi porabnika
$I_{Mhf}$	prispevek dobavitelja k izmerjenemu harmonskemu toku $\underline{I}_{Ch}$ na priključnem mestu
$I_{Phf}$	prispevek porabnika k izmerjenemu harmonskemu toku $\underline{I}_{Ch}$ na priključnem mestu
$\varphi_{I_{M-Ch}}$	fazni kot harmonskega toka zaradi omrežja $\underline{I}_{M-Ch}$
$\varphi_{I_{P-Ch}}$	fazni kot harmonskega toka zaradi porabnika $\underline{I}_{P-Ch}$
$\varphi_{I_{Ch}}$	fazni kot izmerjenega harmonskega toka v točki priključitve $\underline{I}_{Ch}$
$\underline{U}_{Mh}$	harmonska napetost $h$ -tega reda vira na strani dobavitelja
$\underline{U}_{Ph}$	harmonska napetost $h$ -tega reda vira na strani porabnika
$\underline{U}_{M-Ch}$	harmonska napetost $h$ -tega reda na priključnem mestu zaradi dobavitelja
$\underline{U}_{P-Ch}$	harmonska napetost $h$ -tega reda na priključnem mestu zaradi porabnika
$U_{Mhf}$	prispevek dobavitelja k izmerjeni harmonski napetosti na priključnem mestu $\underline{U}_{Ch}$
$U_{Phf}$	prispevek porabnika k izmerjeni harmonski napetosti na priključnem mestu $\underline{U}_{Ch}$
$\varphi_{U_{M-Ch}}$	fazni kot harmonske napetosti zaradi omrežja $\underline{U}_{M-Ch}$
$\varphi_{U_{P-Ch}}$	fazni kot harmonske napetosti zaradi porabnika $\underline{U}_{P-Ch}$
$\varphi_{U_{Ch}}$	fazni kot izmerjene harmonske napetosti na priključnem mestu $\underline{U}_{Ch}$
$\underline{U}_{C1}$	napetost osnovne harmonske komponente na priključnem mestu – efektivna
$\underline{I}_{C1}$	tok osnovne harmonske komponente na priključnem mestu
$\varphi_{C1}$	fazni kot med tokom in napetostjo osnovne frekvence na priključnem mestu
$R_{P1v}$	ohmska komponenta vzporedne vezave bremena na strani porabnika
$X_{Phv}$	reaktivna komponenta vzporedne vezave bremena na strani porabnika
$R_{P1z}$	ohmska komponenta zaporedne vezave bremena na strani porabnika
$X_{Phz}$	reaktivna komponenta zaporedne vezave bremena na strani porabnika
$\underline{U}_{h(porabnik)}$	napetostni vektor $h$ -tega reda, ki ga povzroča porabnik
$\delta_{h(porabnik)}$	fazni kot napetostnega vektorja $h$ -tega reda, ki ga povzroča porabnik
$\underline{U}_{h(po priključitvi)}$	napetostni vektor $h$ -tega reda na priključnem mestu po priključitvi porabnika
$\delta_{h(po priključitvi)}$	fazni kot napetostnega vektorja $h$ -tega reda na priključnem mestu po priključitvi porabnika

---

---

$\underline{U}_{h(\text{pred priključitvijo})}$	napetostni vektor $h$ -tega reda na priključnem mestu, pred priključitvijo porabnika
$U_{\text{Phf}}^*$	prispevek porabnika k izmerjeni harmonski napetosti na priključnem mestu, izračunan po IEC 61000-3-6

### Simboli, dodatno rabljeni v tretjem poglavju

$U_{M5}$	efektivna vrednost 5. harmonske komponente napetosti vira na strani omrežja
$\varphi_{UM5}$	fazni kot napetostnega vira 5. harmonske komponente na strani omrežja
$U_{M13}$	efektivna vrednost 13. harmonske komponente napetosti vira na strani omrežja
$S_{RL}$	navidezna moč $R$ - $L$ bremena na strani porabnika
$\cos\varphi_{RL}$	faktor moči $R$ - $L$ bremena na strani porabnika
$\underline{Z}_{M1\text{-ref}}$	referenčna impedanca na strani omrežja pri osnovni frekvenci
$\cos\varphi_{M1\text{-ref}}$	faktor moči referenčne impedance na strani omrežja pri osnovni frekvenci
$\underline{Z}_{M1}$	dejanska impedanca na strani omrežja pri osnovni frekvenci
$\cos\varphi_{M1}$	faktor moči dejanske impedance na strani omrežja pri osnovni frekvenci
$\underline{Z}_{P5\text{-ref}}$	referenčna impedanca na strani porabnika pri izračunu tokovnih prispevkov
$\underline{Z}_{P5\text{-ref}}^*$	referenčna impedanca na strani porabnika pri izračunu napetostnih prispevkov
$Q_C$	jalova moč kompenzatorja jalove energije
$I_{P5}$	efektivna vrednost tokovnega vira 5. harmonske komponente na strani porabnika
$\varphi_{IP5}$	fazni kot tokovnega vira 5. harmonske komponente na strani porabnika

### Simboli, dodatno rabljeni v četrtem poglavju

$\underline{U}_{C5}$	vektor izmerjene harmonske napetosti 5. reda na priključnem mestu
$U_{C5}$	efektivna vrednost izmerjene 5. harmonske komponente napetosti na priključnem mestu
$I_{C5}$	efektivna vrednost izmerjene 5. harmonske komponente toka na priključnem mestu
$\underline{U}_{5\text{porabnik}}$	napetostni vektor 5. reda, zaradi porabnika, izračunan po IEC 61000-3-6
$U_{P5f}^*$	prispevek porabnika k 5. harmonski komponenti napetosti na priključnem mestu, izračunan po IEC 61000-3-6

- 
- $\underline{U}_{P-C5}$  napetostni vektor 5. reda zaradi porabnika, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami
- $\underline{U}_{P5f}$  prispevek porabnika k 5. harmonski komponenti napetosti na priključnem mestu, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami
- $\underline{U}_{P-C5}$  napetostni vektor 5. reda zaradi porabnika, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami
- $\underline{U}_{P5f}$  prispevek porabnika k 5. harmonski komponenti napetosti na priključnem mestu, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami
- $\underline{U}_{C13}$  izmerjena harmonska napetost 13. reda na priključnem mestu
- $U_{C13}$  efektivna vrednost izmerjene 13. harmonske komponente napetosti na priključnem mestu
- $\underline{U}_{13\text{porabnik}}$  napetostni vektor 13. reda, zaradi porabnika, izračunan po IEC 61000-3-6
- $U_{P13f}^*$  prispevek porabnika k 13. harmonski komponenti napetosti na priključnem mestu, izračunana po IEC 61000-3-6
- $\underline{U}_{P-C13}$  napetostni vektor 13. reda zaradi porabnika, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami
- $\underline{U}_{P13f}$  prispevek porabnika k 13. harmonski komponenti napetosti na priključnem mestu, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami
- $\underline{U}_{P-C13}$  napetostni vektor 13. reda zaradi porabnika, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami
- $\underline{U}_{P13f}$  prispevek porabnika k 13. harmonski komponenti napetosti na priključnem mestu, izračunan po metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami



## POVZETEK

Harmonsko popačenje je ena izmed trinajstih značilnosti kakovosti električne energije. Zaradi naraščanja števila naprav, ki so vir harmonskega popačenja, je problematika harmonskega popačenja vse aktualnejša. Ker so električna omrežja načrtovana za obratovanje s frekvenco 50 Hz oziroma 60 Hz, se vpliva harmonskega popačenja na kakovost električne energije vse bolj zavedajo tudi distributerji električne energije. Harmoniki oziroma harmonsko popačenje se širi v elektroenergetsko omrežje in škodljivo vpliva na porabnike, zato je zmanjšanje vpliva harmonskega popačenja na kakovost električne energije gotovo eden izmed izzivov v prihodnosti. Med rešitvami za zmanjšanje harmonskega popačenja je uvajanje finančnih ukrepov, ki bi tako dobavitelje električne energije kot porabnike spodbudili k ohranjanju harmonskega popačenja znotraj dovoljenih mej, ki so določene s standardi. Vsekakor morajo tovrstne rešitve temeljiti na pravilnem ovrednotenju odgovornosti za harmonsko popačenje.

V doktorski nalogi je obravnavana problematika ugotavljanja odgovornosti za harmonsko popačenje. Metoda, s katero bi lahko preprosto določili odgovornost za harmonsko popačenje, lahko prispeva k zmanjšanju harmonskega popačenja v omrežju, predvsem pa je orodje, ki ga je mogoče v praksi uporabiti za reševanje težav s harmonskim popačenjem.

Teoretično je harmonsko popačenje obravnavano v 0. poglavju, kjer so predstavljeni značilni viri harmonskega popačenja. Opisani so vplivi harmonskega popačenja na omrežje in načini zmanjšanja oziroma odpravljanja harmonskega popačenja. Da bi omejili problem širjenja in vpliva harmonskega popačenja na druge porabnike v omrežju, je treba predvsem poiskati metode, ki omogočajo pravilno ovrednotenje odgovornosti za harmonsko popačenje. Na podlagi ugotovljenih deležev odgovornosti se lahko izvedejo ustrezni ukrepi, na podlagi katerih je mogoče porabnikom zagotoviti ustrezno kakovost električne energije, ki je določena s standardi. V Sloveniji veljaven standard SIST EN 50160 je predstavljen v razdelku 1.9.1, pri čimer je obravnavano le področje harmonskega popačenja. V razdelku 1.9.2 je predstavljen tudi del tehničnega poročila IEC 61000-3-6, ki se nanaša na določanje emisij harmonskega popačenja.

Glavni prispevek doktorske naloge je metoda za določanje deležev odgovornosti za harmonsko popačenje, pri čimer ni potrebno natančno poznavanje značilnosti omrežja, kar pomeni, da je primerna tudi za praktično uporabo.

V razdelku 2.1 doktorske naloge je obravnavana osnovna metoda harmonskih vektorjev, s katero je mogoče, na podlagi meritev v eni točki omrežja, določiti delež odgovornosti za harmonsko popačenje. Obravnavana točka v omrežju je običajno priključno mesto porabnika na omrežje. Pri osnovni metodi tokovnih harmonskih vektorjev sta omrežna stran in stran porabnika predstavljeni z Nortonovim ekvivalentnim tokokrogom za posamezni harmonski red. Z metodo merjenja v eni točki raziskujemo delež harmonskega popačenja posameznega porabnika glede na preostalo omrežje, vendar zahteva tovrstna metoda poznavanje podatkov o dejanskih harmonskih impedancah tako na strani porabnika kot na strani omrežja, ki pa so v praksi pogosto nedostopni.

V razdelku 2.2. je predstavljena posodobljena metoda harmonskih tokovnih in napetostnih vektorjev, ki upošteva referenčne impedance in je tudi osrednja tema doktorske naloge. Referenčne impedance v okviru posodobljene metode harmonskih vektorjev rešujejo problem poznavanja dejanskih harmonskih impedanc. Po metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami je mogoče določiti in ovrednotiti prispevke k harmonskemu popačenju porabnika in dobavitelja (omrežja). 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. Referenčne impedance porabnika so predlagane na podlagi obstoječe prakse glede faktorja moči porabnika, kjer se zahteve po pretežno ohmskem značaju porabnika pri osnovni frekvenci razširijo na vse harmonske frekvence. Za referenčno impedanco na strani porabnika je predlagana ohmska komponenta bremena porabnika, ki jo je mogoče določiti na podlagi meritev na mestu priključitve porabnika na omrežje. Referenčna impedanca na strani omrežja je določena z vsoto impedance napajalnega transformatorja in kratkostične impedance omrežja.

Poleg metode harmonskih vektorjev je v razdelku 2.3 predstavljena tudi metoda, ki temelji na priporočilih tehničnega poročila IEC 61000-3-6. Emisija harmonskega popačenja posameznega porabnika po IEC 61000-3-6 je opredeljena kot razlika med harmonskim popačenjem oziroma posamezno harmonsko komponento pred priključitvijo porabnika v omrežje in po njej.

Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami je v 3. poglavju preizkušena na matematičnem modelu omrežja v programskem paketu MATLAB, kjer so obravnavani različni referenčni primeri. Obravnavani so trije primeri, in sicer primer harmonskega vira samo na strani omrežja, primer s harmonskim virom samo na strani porabnika ter primer



harmonskih virov na strani porabnika in na strani omrežja. Analiziran je vpliv sprememb na strani omrežja in porabnika (sprememba harmonskega vira, impedance) na harmonsko popačenje ter posledično na rezultate metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami. Metoda v vseh primerih podaja pravilno oceno o odgovornosti za harmonsko popačenje na priključnem mestu porabnika na omrežje. Rezultati metode kažejo, da je mogoče pravilno oceniti odgovornost za harmonsko popačenje v primeru različnih sprememb v omrežju. Porabnik na primer ne more biti odgovoren za spremembe harmonskega popačenja, ki so posledica sprememb v omrežju, na katere neposredno ne vpliva. Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami smiselno ovrednoti prispevke k harmonskemu popačenju tudi v primeru resonančnih razmer, kjer je odgovornost za povečanje harmonskega popačenja na strani povzročitelja resonančnih razmer.

V 4. poglavju je podana primerjava metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje. Primerjane so tri metode: metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami, metoda harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami in metoda po IEC 61000-3-6. Primerjava metod v razdelku 4.1 temelji na matematičnem modelu omrežja v programskem okolju MATLAB. Rezultati primerjave kažejo, da je metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami najmanj občutljiva za različne spremembe v omrežju ali pri porabniku. Medtem ko metoda po IEC 61000-3-6 spremembe harmonskega popačenja zaradi sprememb v omrežju odraža v spremenjeni odgovornosti porabnika, metoda harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami nepravilno ovrednoti odgovornost v primeru resonančnih razmer. Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami podaja smiselne rezultate tudi v primeru resonančnih razmer. Pri tem metoda ne zahteva poznavanja dejanskih impedanc porabnika in pripadajočih frekvenčnih karakteristik, kar je velika prednost pri praktični uporabi.

Iz tega razloga je bila v okviru doktorske naloge metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami implementirana v merilni instrument. Zaradi primerjave je bila v merilni instrument implementirana tudi metoda po IEC 61000-3-6. Izvedene so bile tedenske deset minutne meritve harmonskega popačenja in odgovornosti na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Obravnavana je bila samo 5. harmonska komponenta, izmerjena na nizkonapetostni strani napajalnega transformatorja v transformatorski postaji TP Stara. V okviru meritev so bile ponovno primerjane različne metode za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje. Medtem ko sta bili metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami in metoda po IEC 61000-3-6 uporabljeni z merilnim instrumentom, je bil

---

izračun po osnovni metodi harmonskih vektorjev izveden s pomočjo programskega paketa MATLAB, pri čimer so bile uporabljene ocenjene dejanske impedance. Rezultati metod so si zelo podobni in kažejo na polno odgovornost porabnika (Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani) za tokovno popačenje 5. reda. Za napetostno popačenje 5. reda je v pretežni meri odgovorno omrežje. Povečano odgovornost porabnika je mogoče opaziti le med delovnimi urami, ko se na fakulteti poveča število priključenih bremen, ki so vir 5. harmonske komponente (na primer računalnikov). Primerjava metod je pokazala, da je v večini primerov metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami najrestriktivnejša do porabnika.

Prednost metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami je vsekakor v preprostem določanju referenčnih impedanc in v pravilnem ovrednotenju odgovornosti za harmonsko popačenje v primeru sprememb na strani omrežja ali porabnika oziroma v primeru resonančnih stanj. Metoda ne zahteva podatkov o dejanskih impedancah porabnika in pripadajočih frekvenčnih karakteristikah, ki so v praksi pogosto nedostopni. V primerjavi s pristopom, ki je predlagan v IEC 61000-3-6, je metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami precej natančnejša, saj poleg amplitude upošteva tudi fazni kot med napetostjo in tokom posamezne harmonske komponente. Na podlagi faznega kota lahko ugotovimo, ali porabnik prispeva ali zmanjšuje posamezno harmonsko komponento na priključnem mestu. Hkrati primerjava razmer pred priključitvijo porabnika in po njej, kot je predlagano v IEC 61000-3-6, neustrezno upošteva spremembe v omrežju (na primer spremembe impedance), ki se odražajo v spremenjeni odgovornosti porabnika. Porabnik namreč nima vpliva na spremembe harmonskega popačenja, ki so posledica sprememb na strani omrežja.

Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami omogoča ovrednotenje odgovornosti za harmonsko popačenje na podlagi meritev napetosti in toka v priključni točki porabnika v omrežje, s čimer je zelo primerna za praktično uporabo in implementacijo v merilne instrumente.

**Ključne besede:** harmonsko popačenje, odgovornost za harmonsko popačenje, metoda harmonskih vektorjev, referenčne impedance, resonančne razmere

**ABSTRACT**

Harmonic distortion is one of the power quality parameters. The widespread use of power electronic loads continues to raise concerns about harmonic pollution in power networks. As power networks were not designed to operate at frequencies other than 50 or 60 Hz, the utilities are aware of harmonics impact on power quality. Causing power losses, interference problems and possible operation failures of sensitive equipment, harmonic pollution has become one of the major power quality problems to be solved in the near future. To limit the impact of harmonic distortion in power systems the incentive based schemes have been proposed to encourage the utility and the customer side to retain harmonic distortion within the limits defined by standards. These schemes include economic incentives to charge harmonic production facilities for their contribution to harmonic distortion. Such schemes must be based on the determination of harmonic contributions from different sources.

The determination of responsibility for harmonic distortion is discussed in the doctoral thesis where a method for harmonic contributions determination is proposed. A method for harmonic contribution determination would contribute to mitigate the harmonic distortion in the power network. The simplicity of such method is the main requirement for the widespread usage in practice.

Fundamentals of harmonics are discussed in chapter 0 where different harmonic sources are presented. In addition effects of harmonic distortion and principles for controlling the harmonic distortion are presented. Relevant standard for harmonic distortion in Slovenia is SIST EN 50160 and is presented in chapter 1.9.1. Additionally a part of IEC 61000-3-6 technical report is presented in chapter 1.9.2, where determination of harmonic emission levels is discussed.

A main contribution of doctoral thesis is a method for harmonic contributions determination where no detailed network data is required. The method is suitable for practical implementation.

In chapter 2.1 basic harmonic vector method is presented. Basic harmonic vector method enables the calculation of harmonic contributions based on measurements in a single point in the network. The measurement point is usually a point where customer is connected to the utility network i.e. point of common coupling (PCC). The basic current harmonic vector

---

method represents the customer and the utility side with the Norton equivalent circuit for a particular harmonic order. The method has some practical deficiencies as it requires the knowledge of the customer and the utility impedances at a particular harmonic order. Although the fundamental frequency impedances can usually be obtained their frequency characteristics are rarely available.

In chapter 2.2 a modified harmonic vector method with reference impedances is presented and represents the main topic of the doctoral thesis. A modified harmonic vector method is based on reference impedances therefore no actual impedance data is necessary. The main idea is to transform any customer or utility impedance deviation from the reference one into an additional harmonic source. The customer reference impedance determination is based on an extended power factor management policy where customer load should be purely resistive not only at fundamental frequency, but also at all harmonic frequencies. As the customer reference impedance a resistance is introduced and can be calculated directly from the measurement data at PCC. The utility reference impedance is defined as the sum of the short circuit network impedance and the last transformer impedance before the connection point.

In chapter 2.3 a method according to IEC 61000-3-6 technical report is presented. The customer harmonic emission level according to IEC 61000-3-6 is defined as the difference in harmonic conditions before and after the customer is connected to the network.

The harmonic vector method with reference impedances is tested on a mathematical network model in chapter 3. A study of harmonic vector method with reference impedances is performed in the MATLAB software. Different reference cases are analyzed, i.e. a case where harmonic source is just on the utility side, a case with harmonic source only on the customer side and most usual case in practice with harmonic sources on both sides. Impacts of different network changes (impedance, harmonic source) on harmonic distortion and on the results of the harmonic vector method with reference impedances are studied. The method is able to determine the responsibility for harmonic distortion taking into account different changes in the network. For example, the customer should not be held responsible for changes in harmonic distortion due to changes on the utility side. The harmonic vector method with reference impedance enables fair evaluation of the responsibility for harmonic distortion in resonance conditions that may cause harmonics amplification.

In chapter 4 three different methods for harmonic responsibility determination are compared, i.e. basic harmonic vector method, harmonic vector method with reference impedances and

the method according to IEC 61000-3-6. The method comparison in chapter 4.1 is based on mathematical network model in the MATLAB software. The harmonic vector method is proved to be the most robust and insensible to various changes in the customer or the utility network. As the method according to IEC 61000-3-6 shows changed customer responsibility for harmonic distortion in case of utility impedance change, the basic harmonic vector method does not consider any resonance conditions. The harmonic vector method with reference impedances also shows responsibility arising from resonance conditions causing harmonic amplification. The main advantage of the proposed method is that it does not require the knowledge of actual impedances which makes it suitable for practical implementation.

Due to the mentioned facts, the harmonic vector method with reference impedances was implemented into the measurement device. In addition also the method according to IEC 61000-3-6 was implemented into the measurement device. Ten-minutes measurements were carried out at the 10/0,4 kV substation TP Stara feeding the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. The measurements were performed for one week and only 5th order harmonic was measured and analyzed. Again different methods for harmonic contributions determination were compared. Harmonic vector method with reference impedances and the method according to IEC 61000-3-6 were used with the measurement device, while the calculation with the basic harmonic vector method, where estimated actual impedances were used, was performed off-line in MATLAB software. The results of the methods are similar and indicate full customer (Faculty of Electrical Engineering) responsibility for the 5th order current harmonic. The responsibility for the 5th order voltage harmonic is mainly on the utility side. Increased customer responsibility for the 5th voltage harmonic is indicated during the working hours when many loads producing 5th harmonic are connected to the faculty network (e.g. computers). The results show that most of the time the harmonic vector method with reference impedances is the most restrictive to the customer.

The main advantage of the harmonic vector method with reference impedances is the simplicity. The simple determination of reference impedances enables practical usage. The method allows fair estimation of the responsibility for harmonic distortion in case of various changes on the utility or the customer side and also enables the responsibility evaluation in case of resonance conditions. The harmonic vector method with reference impedances does not require the knowledge of the actual customer impedances and their frequency characteristics which are rarely available. In comparison to the approach according to IEC 61000-3-6, the harmonic vector method with reference impedances enables better evaluation

of responsibility for harmonic distortion as it takes into account not only the magnitude but also the phase angle of a particular harmonic. The phase angle information can indicate whether the customer is mitigating or amplifying particular harmonic at PCC. In case of changes on the utility side the method according to IEC 61000-3-6 shows modified customer responsibility for harmonic distortion. The customer should not be held responsible for the harmonic distortion variations due to changes on the utility side.

The harmonic vector method with reference impedances enables the evaluation of responsibility for harmonic distortion based just on the current and the voltage measurements at PCC. This makes the method suitable for implementation into the measurement device and for practical usage.

**Key words:** harmonic distortion, responsibility for harmonic distortion, harmonic vector method, reference impedances, resonance conditions

## UVOD

Kakovost električne energije je v tehnološko razvitem svetu vse pomembnejši dejavnik. Proizvajalci, distributerji in porabniki električne energije se v obdobju liberaliziranega trga in rasti porabe električne energije vse bolj zavedajo pomena kakovostne preskrbe z električno energijo. V grobem bi lahko razloge za povečano skrb glede kakovosti električne energije strnili v štiri skupine:

- ∂ sodobne naprave v različnih procesih uporabljajo mikroprocesorje in druge elektronske naprave, ki so precej občutljive na kakovost električne energije;
- ∂ neprestana rast števila naprav, ki v primarni vlogi zagotavljajo boljšo učinkovitost, zmanjšujejo izgube, na drugi strani obremenjujejo omrežje z različnimi motnjami in s tem postavljajo pod vprašaj zmožnost absorpcije tovrstnih vplivov s strani elektroenergetskega sistema;
- ∂ odjemalci oziroma porabniki električne energije postajajo vse bolj ozaveščeni glede kakovosti električne energije in to v času odprtega trga z električno energijo zahtevajo tudi od dobaviteljev;
- ∂ zaradi prepletenosti različnih sistemov v električnih omrežjih ima lahko izpad posameznega sklopa ali naprave zaradi slabe kakovosti električne energije veliko širše posledice, ki lahko vodijo do velikih finančnih izgub.

Harmonsko popačenje je ena izmed trinajstih značilnosti kakovosti električne energije. Problem harmonskega popačenja je znan že z začetka prejšnjega stoletja, vendar se je vpliv harmonskega popačenja precej povečal v zadnjih desetletjih, ko se je povečala uporaba naprav, ki povzročajo harmonsko popačenje. Harmonsko popačenje je večinoma proizvedeno z nelinearnimi bremenami in se po elektroenergetskem omrežju širi v širšo in ožjo okolico električnega omrežja, kjer lahko škodljivo vpliva na naprave porabnika in omrežja. V preteklih letih je bilo veliko doseženega predvsem na področjih standardizacije in merjenja harmonskega popačenja ter modeliranja harmonskih virov, s čimer so postale harmonske analize pomemben člen pri analizah in načrtovanju elektroenergetskih sistemov. Škodljivim vplivom harmonskega popačenja se je mogoče izogniti z ustrezno zamenjavo problematične opreme oziroma namestitvijo ustrezne zaščitne opreme (filtrov harmonikov), vendar so v večini primerov ti ukrepi povezani s precejšnjimi finančnimi vložki. Običajno se v tovrstnih

primerih vedno zastavlja vprašanje, kdo je dolžan kriti stroške izboljšanja stanja kakovosti električne energije. Samoumevno je, da investicije financira tisti, ki je v določenem primeru odgovoren za nastalo situacijo, vendar pa je določanje odgovornosti, na primer za harmonsko popačenje, izjemno kompleksen problem. Kljub temu da je mogoče harmonike v določeni točki omrežja razmeroma preprosto izmeriti, je zelo težko določiti njihov izvor oziroma določiti delež posameznih virov. Pravilna določitev virov harmonskega popačenja in prispevkov k popačenju je tako eden izmed ključnih dejavnikov pri reševanju težav tako s stališča izboljšanja kakovosti električne energije oziroma harmonskega popačenja kot tudi s stališča investicij v posodobitve elektroenergetskega sistema. S pravilno določitvijo deleža odgovornosti bi bilo mogoče od povzročitelja harmonskega popačenja zahtevati, da v določeni točki omrežja izboljša kakovost električne energije oziroma zahtevati ustrezno nadomestilo za povzročanje neustrezne kakovosti električne energije. Pri tem osnovni namen ni obravnavanje posameznih majhnih, na primer gospodinjskih porabnikov, ampak večjih, ki neposredneje vplivajo na omrežje in so običajno večji vir harmonskega popačenja.

### **Problematika in cilji doktorske naloge**

Tema doktorske disertacije je povezana s problemom harmonskega popačenja, ki sega na področje kakovosti električne energije v elektroenergetskih omrežjih. Doktorska naloga se osredotoča na določanje deležev odgovornosti za harmonsko popačenje v določeni točki omrežja. V literaturi so podane rešitve za določanje virov harmonskega popačenja, vendar pa ne ponujajo preprostih in zanesljivih rešitev, ki bi omogočale ovrednotenje odgovornosti za harmonsko popačenje v omrežju in bi bile hkrati primerne tudi za praktično uporabo. Na eni strani so drage in kompleksne metode določanja prispevkov harmonskega popačenja na podlagi sinhroniziranih meritev v več točkah omrežja, medtem ko so na drugi strani preprostejše in cenejše metode določanja prispevkov na podlagi meritev v eni točki omrežja, vendar pa te metode za določanje virov harmonskega popačenja oziroma odgovornosti zahtevajo natančno poznavanje značilnosti omrežja in porabnika (harmonske impedance). V praksi je problem natančnega poznavanja podatkov omrežja oziroma porabnika pogosto zelo pereč problem in je ovira tudi pri uvajanju metod nadzora in ugotavljanja povzročiteljev harmonskega popačenja v realnem elektroenergetskem omrežju.



Doktorska naloga se ukvarja z metodo harmonskih vektorjev, s katero je mogoče na podlagi meritev v eni točki omrežja določiti delež odgovornosti za harmonsko popačenje. Z metodo merjenja v eni točki raziskujemo delež harmonskega popačenja posameznega porabnika glede na preostalo omrežje, vendar zahteva tovrstna metoda poznavanje harmonskih impedanc tako na strani porabnika kot na strani omrežja. V doktorski nalogi je predstavljena posodobljena metoda harmonskih tokovnih in napetostnih vektorjev, pri čimer so uporabljene referenčne impedance. Na ta način je mogoče rešiti problem poznavanja dejanskih harmonskih impedanc ter določiti in ovrednotiti prispevke k harmonskemu popačenju porabnika in dobavitelja oziroma omrežja.

Glavni cilj doktorske disertacije je bil določiti referenčne impedance na strani omrežja in porabnika, ki bi omogočale preprosto uporabo metode v realnih omrežjih in na podlagi katerih bi bilo mogoče pravilno ovrednotiti odgovornost za harmonsko popačenje v točki priključitve porabnika v omrežje. Metoda določanja prispevkov k harmonskemu popačenju z uporabo referenčnih impedanc omogoča pravilno določitev odgovornosti tudi v primeru resonančnih stanj, v katerih na primer porabnik z neustrezno impedanco povzroča ojačenje določenih harmonskih komponent in s tem tudi celotnega harmonskega popačenja. Metoda je bila preizkušena z matematičnim modelom v programskem paketu MATLAB in v realnem električnem omrežju, kjer je podana tudi primerjava različnih metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje.

### **Prispevki k znanosti**

Osrednji prispevek doktorske disertacije je metoda za določanje deležev odgovornosti za harmonsko popačenje v točki priključitve porabnika na omrežje. Metoda omogoča pravilno ovrednotenje odgovornosti tudi v primeru resonančnih stanj. Zaradi enostavnosti je metoda primerna za praktično uporabo. Predlagano metodo je mogoče uporabiti v merilnem instrumentu, s katerim je mogoče v opazovani točki omrežja poleg meritev kakovosti električne energije določiti tudi odgovornost za harmonsko popačenje.

Glavni prispevki doktorske disertacije so naslednji:

1. Metoda za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje na podlagi meritev v eni točki omrežja, ki ne zahteva podrobnega poznavanja značilnosti porabnika in omrežja;
2. Določanje referenčnih impedanc na podlagi razširitev zahtev glede faktorja moči, kjer se želeni faktor moči zahteva pri osnovni frekvenci in tudi pri vseh harmonskih frekvencah;
3. Pravilno ovrednotenje odgovornosti za harmonsko popačenje v resonančnih stanjih;
4. Možnost uporabe metode za reševanje praktičnih problemov, spremljanje odgovornosti za harmonsko popačenje v realnih omrežjih in s tem osnova za morebitno uvedbo finančnih nadomestil za povzročanje harmonskega popačenja.

### **Seznam publikacij**

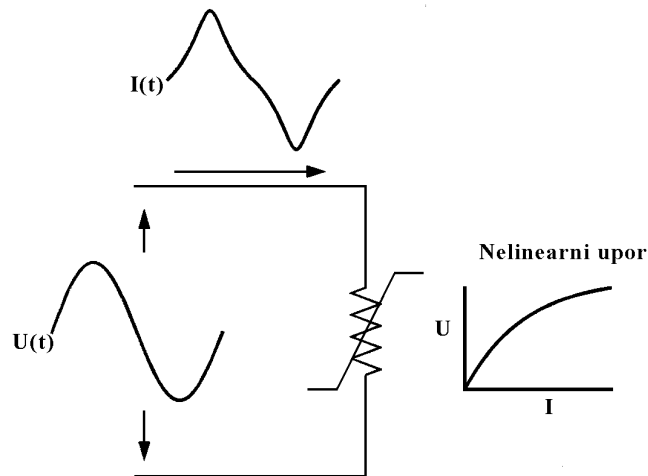
- [1] Blažič, B., Papič, I., Pfajfar, T., "A modified harmonic current vector method for harmonic contribution determination," IEEE PES Power System Conference & Exposition, New York City, NY, oktober 2004.
- [2] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., "A reference impedance based harmonic current vector method for determining harmonic contributions," 40th International Universities Power Engineering Conference, Cork: Institute of Technology, september 2005.
- [3] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., "Harmonic current vector method with reference impedances," 12th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Cascais, Portugal, oktober 2006.
- [4] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., "Estimation of harmonic emission levels with harmonic current vector method with reference impedances," Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Power and Energy Systems, Palma de Mallorca, Spain, avgust 2007.

- [5] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., “Harmonic current vector method with reference impedances - field measurement verification,” 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, oktober 2007.
- [6] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., “Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 23, pp. 425–433, januar 2008.
- [7] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., “Assessment of voltage harmonic emission levels,” Proceedings of the Eight IASTED International Conference on Power and Energy Systems, Corfu, Greece, junij 2008.
- [8] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., “Methods for estimating customer voltage harmonic emission levels,” 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, New South Wales, Australia, september 2008.
- [9] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., “Managing the responsibility for harmonic distortion in power networks,” Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 2538–2545, oktober 2008.



## 1 HARMONSKO POPAČENJE

Periodične valovne oblike, ki odstopajo od čistega sinusnega vala, imenujemo harmonsko popačenje. Povzročajo ga nelinearne naprave, katerih tok ni proporcionalen z njihovo napajalno napetostjo. Slika 1.1 prikazuje popačenje toka kot posledico nelinearnega upora, na katerega je priključena napetost sinusne oblike [1].



Slika 1.1: Popačenje toka zaradi nelinearnega upora

Vsako periodično in popačeno funkcijo je mogoče izraziti z vsoto sinusnih funkcij (Fourierova trigonometrična vrsta), kjer je frekvenca posameznih sinusnih funkcij enaka celoštevilskemu večkratniku osnovne frekvence popačenega signala. Iz tega sledi, da so harmonske komponente oziroma harmoniki sinusne napetosti ali tokovi, katerih frekvence so celoštevilski večkratniki omrežne frekvence ( $f = 50$  Hz).

### 1.1 Fourierova vrsta

S Fourierovo transformacijo preslikamo funkcijo iz časovnega v frekvenčni prostor. Funkcija tako ni predstavljena z amplitudami v različnih časovnih trenutkih, ampak z amplitudami po posameznih harmonskih frekvencah [2], [3].

Fourierova transformacija funkcije  $f(t)$  mora zadoščati določenim pogojem:

- ∂ funkcija  $f(t)$  mora biti na intervalu  $[a, b]$  zvezna;
- ∂ funkcija  $f(t)$  mora biti odsekovno odvedljiva.

Tako je mogoče vsako periodično funkcijo, ki zadošča omenjenim pogojem, zapisati v obliki Fourierove trigonometrične vrste, kot jo opisuje enačba (1):

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h \cdot \omega_0 \cdot t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \sin(h \cdot \omega_0 \cdot t), \quad (1)$$

kjer je  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  in  $T_0$  perioda obravnavanega signala.

Vrednosti parametrov Fourierove vrste za posamezne harmonske frekvence  $h$  so določene z enačbami (2), (3) in (4):

$$a_0 = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cdot dt, \quad (2)$$

$$a_h = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cdot \cos(h \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot dt, \quad (3)$$

$$b_h = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cdot \sin(h \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot dt. \quad (4)$$

Periodična funkcija je tako sestavljena iz vsote konstante ( $a_0$  je enosmerna komponenta) in neskončnih vrst kosinusnih in sinusnih členov ( $a_h$  in  $b_h$  sta amplitudi posameznih kosinusnih oziroma sinusnih členov). Kosinusni in sinusni členi s frekvencami, ki so večkratniki osnovne frekvence, so harmonske komponente.

Enačbo (1) lahko zapišemo v naslednji obliki:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cos(h \cdot \omega_0 \cdot t + \theta_h), \quad (5)$$

kjer je

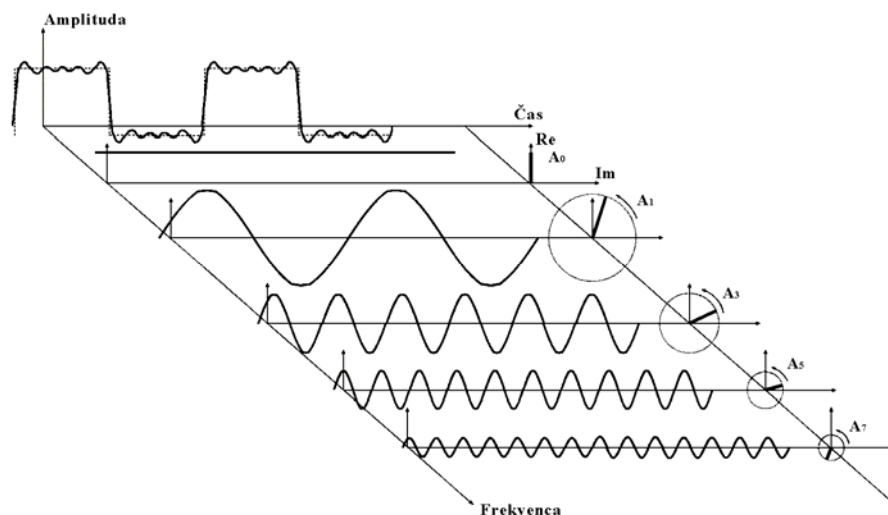
$$A_0 = \frac{1}{2} a_0, \quad (6)$$

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, \quad (7)$$

$$\theta_h = \arctg\left(-\frac{b_h}{a_h}\right). \quad (8)$$

Člen  $A_0$  predstavlja enosmerno komponento, medtem ko sta  $A_h$  in  $\theta_h$  amplituda oziroma fazni kot  $h$ -te harmonske komponente.

Primer razčlenitve popačenega signala na posamezne člene Fourierove vrste oziroma harmonske komponente je prikazan na sliki 1.2.



Slika 1.2: Harmonске komponente periodičnega signala

## 1.2 Harmoniki v trifaznem sistemu

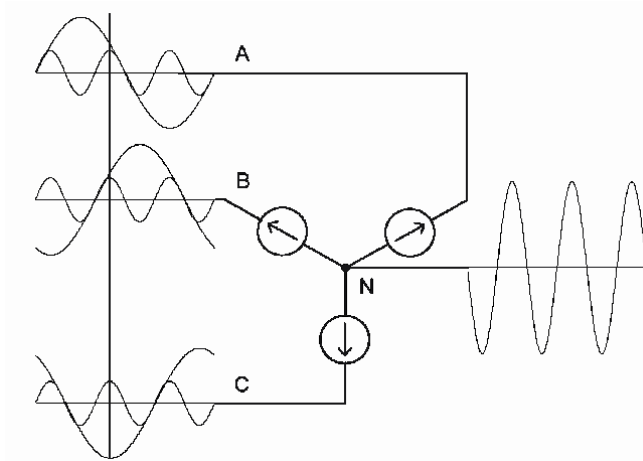
V simetričnem trifaznem sistemu so osnovne komponente medsebojno premaknjene za 120 električnih stopinj, pri tem pa harmonske komponente zasledimo v posameznih fazah. V uravnoteženem trifaznem sistemu je fazni premik harmonskih komponent določen s produktom faznega premika osnovnih komponent in reda harmonske komponente  $h$ . V uravnoteženem trifaznem sistemu je fazni zamik med tretjimi harmonskimi komponentami

posameznih faz  $3 \cdot 120$  električnih stopinj, kar je enako  $360$  oziroma  $0$  električnih stopinj. Tretje harmonske komponente so torej v fazi in tvorijo nični sistem. Pri peti harmonski komponenti so fazni zamiki  $5 \cdot 120$  električnih stopinj oziroma  $-120$  električnih stopinj. To pomeni, da je fazni premik med peto harmonsko komponento druge in prve faze  $-120$  električnih stopinj, kar predstavlja negativni ali protifazni sistem. Trifazni simetrični sistem petih harmonskih komponent se vrti v nasprotni smeri vrtenja osnovnega sistema. Pri sedmih harmonskih komponentah je fazni zamik  $7 \cdot 120$  električnih stopinj oziroma  $120$  električnih stopinj, kar pomeni, da je sedma harmonska komponenta druge faze zamaknjena za  $120$  električnih stopinj glede na prvo fazo. Sedme harmonske komponente tako v uravnoveženem trifaznem sistemu tvorijo pozitiven ali sofazni sistem, ki ima enako smer vrtenja kot osnovni sistem.

Ugotovimo lahko, da nični sistem tvorijo harmonske komponente 3., 9., 15., 21., 27. ... reda, protifazni sistem harmonske komponente 5., 11., 17., 23.... reda in sofazni sistem harmonske komponente 7., 13., 19., 25.... reda. Poudariti je treba, da to velja le, kadar harmonske komponente tvorijo v trifaznem sistemu popolnoma uravnovežen sistem, kar pomeni, da ima določena harmonska komponenta v vseh fazah enako amplitudo in da je v posamezni fazi zamaknjena za enak fazni kot glede na osnovno harmonsko komponento v svoji fazi.

Posebno pozornost velja nameniti harmonskim komponentam, ki tvorijo nični sistem. Te so pomembne v omrežjih z nevtralnim vodnikom, saj lahko povzročijo preobremenitev nevtralnega vodnika, interferenco v telefoniji itd.. Primer uravnoveženega sistema, ki vsebuje tretjo harmonsko komponento, je prikazan na sliki 1.3, kjer v nevtralnem vodniku teče vsota tretjih harmonskih komponent posamezne faze.





Slika 1.3: Tok v nevtralnem vodniku kot posledica tretje harmonske komponente v posamezni fazi

Z odstranitvijo nevtralnega vodnika iz vezave zvezda je pretok tretje harmonske komponente onemogočen. Prav tako je pretok tretje harmonske komponente v omrežje onemogočen pri transformatorju v vezavi trikot, kjer tretji harmoniki tečejo v zaključenem krogu, ki ga tvorijo vsa tri navitja. Kljub temu je treba poudariti, da tovrstne rešitve veljajo le za uravnovežene sisteme. V primeru neravnovesja med fazami v sistemu tretje harmonske komponente ne tvorijo več samo ničnega sistema, ampak obstajata tudi sofazna in protifazna komponenta.

### 1.3 Električne veličine v harmonsko popačenem sistemu

Običajno so električne veličine, kot so efektivne vrednosti, delovne in jalove moči, faktorji moči itd., definirani za osnovno frekvenco signala v sinusnih oziroma nepopačenih razmerah. Prisotnost harmonskega popačenja pomeni obratovanje električnega sistema v nesinusnih razmerah, kar spremeni tudi izračun posameznih električnih veličin [2], [4], [5].

#### 1.3.1 Delovna, jalova in navidezna moč

V tem razdelku so izračuni električnih moči podani za enofazne obremenitve. Navidezna moč  $S$  je definirana kot produkt:

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef}, \quad (9)$$

kjer sta  $U_{\text{ef}}$  in  $I_{\text{ef}}$  efektivni vrednosti napetosti oziroma toka. V sinusnih razmerah vsebujeta napetost in tok samo osnovno harmonsko komponento (50 Hz), medtem ko v harmonsko popačenih oziroma nesinusnih razmerah napetost in tok vsebujeta tudi višje harmonske komponente, kot je prikazano na sliki 1.2. Efektivne vrednosti napetosti in toka, ki poleg osnovne komponente vsebujejo tudi harmonske komponente, so podane z enačbama (10) in (11).

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\text{maks}}} (U_h)^2} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{h_{\text{maks}}}^2} \quad (10)$$

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\text{maks}}} (I_h)^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{\text{maks}}}^2} \quad (11)$$

$U_h$  in  $I_h$  v (10) in (11) predstavljata efektivno vrednost napetosti in toka  $h$ -tega harmonskega reda. S prisotnostjo harmonskega popačenja se spremeni tudi izračun moči. Navidezna ( $S$ ) in delovna moč ( $P$ ) sta še vedno nedvoumno določeni, medtem ko je pojmovanje jalove moči ( $Q$ ) nekoliko zapletenejše. Zato je bila uvedena nova veličina, imenovana moč popačenja  $D$  (angl. distortion power), ki predstavlja vsoto vseh produktov tokov in napetosti pri različnih frekvencah. Jalova in delovna moč sta sestavljena iz vsote jalovih oziroma delovnih moči vseh harmonskih frekvenc. Enačbe (12), (13), (14) in (15) podajajo navidezno, delovno in jalovo moč ter moč popačenja in zveze med njimi v primeru prisotnosti harmonskega popačenja.

$$S = U_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \quad (12)$$

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad (13)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (14)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (15)$$

### 1.3.2 Faktor moči

Faktor moči  $\cos\varphi$  oziroma PF (angl. power factor) je definiran kot razmerje med delovno in absolutno vrednostjo navidezne moči. Ob prisotnosti harmonskega popačenja je definicija faktorja moči nekoliko nejasna. V glavnem se pojavljata dva načina izračuna faktorja moči, in sicer premaknjeni faktor moči *DPF* (angl. displacement power factor) in pravi faktor moči *TPF* (angl. true power factor). Premaknjeni faktor moči je enak kosinusu kota med napetostjo in tokom osnovne harmonske komponente oziroma je definiran kot razmerje med delovno in absolutno vrednostjo navidezne moči osnovne harmonske komponente. Premaknjeni faktor moči je v primeru čistega sinusnega signala oziroma harmonsko popačenega signala določen z enačbo (16).

$$DPF = \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (16)$$

Pravi faktor moči opisuje enačba (17) in je podan kot razmerje med celotno delovno in absolutno vrednostjo navidezne moči. Ob prisotnosti harmonskega popačenja je pravi faktor moči manjši kot premaknjeni faktor moči.

$$TPF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_h U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h}{\sum_{i,j} U_i \cdot I_j} \quad (17)$$

Pravi faktor moči predpostavlja enak vpliv vseh harmonskih komponent na električno omrežje. Ker povzročajo tokovi višjih frekvenc v transformatorjih in napajalnih sistemih višje izgube, sta absolutna vrednost navidezne moči in vrednost faktorja moči ovrednoteni na podlagi utežnih faktorjev za merjene tokove [6]. Predstavljen je harmonsko prilagojen faktor moči *HPF* (angl. harmonic adjusted power factor), ki je podan z enačbo (18):

$$HPF = \frac{P}{\sum_{i,j} U_i I_{jh}}, \quad (18)$$

kjer je merjeni tok  $I_{jh}$  določen z enačbo (19).

$$I_{\text{jh}} = \sqrt{\sum_h (K_h \cdot I_h)^2} \quad (19)$$

Tu lahko izpostavimo predvsem dva načina izračuna utežnih faktorjev  $K_h$ . Pri organizaciji IEEE so predlagali, naj se utežni faktor izračuna na podlagi enačbe (20), kjer  $h$  predstavlja red harmonske komponente.

$$K_h = h^{1,333} \quad (20)$$

Drugi način izračuna utežnih faktorjev je podan na podlagi ohmskega kožnega efekta v prevodnikih (angl. resistive skin effect) in je izražen z enačbo (21).

$$K_h = \sqrt{h} \quad (21)$$

### 1.3.3 Kratkostična moč

Kratkostična moč je odvisna od nazivne napetosti omrežja  $U_n$  in od absolutne vrednosti impedance  $Z$  med virom, ki napaja to omrežje, in točko, kjer računamo kratkostično moč [7]. Če je virov, ki so kakorkoli fizično povezani s to točko, več, potem izračunamo nadomestno impedanco do ekvivalentnega vira moči. Kratkostična moč je podana kot absolutna vrednost in je definirana z enačbo (22).

$$S_K'' = \frac{U_n^2}{Z} \quad (22)$$

### 1.3.4 Nazivna moč naprav

Nazivna moč naprav  $S_n$  je moč, za katero so naprave narejene za delo v običajnih obratovalnih pogojih. Nazivna moč je podana kot absolutna vrednost in je določena glede na način priključitve v električno omrežje (enofazno, medfazno, trifazno) ter vrste obremenitve [7]. V primeru trifazne priključitve je treba razlikovati med uravnoveženo in neuravnoveženo obremenitvijo. Nazivno moč naprave izračunamo iz nazivne efektivne vrednosti faznega toka ( $I_n$ ), ki teče skozi napravo, in iz enofazne ( $U_f$ ) oziroma medfazne ( $U_{mf}$ ) nazivne vrednosti napetosti. Pri enofazni priključitvi je nazivna moč podana z enačbo (23).

$$S_n = U_f \cdot I_n \quad (23)$$

Pri medfazni priključitvi je nazivna moč določena z enačbo (24).

$$S_n = U_{mf} \cdot I_n \quad (24)$$

V primeru uravnotežene trifazne obremenitve je nazivna moč določena z enačbo (25).

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_{mf} \cdot I_n \quad (25)$$

Nazivna moč opreme pri neuravnoteženi trifazni obremenitvi se izračuna na podlagi maksimalne efektivne vrednosti toka v kateri koli fazi ( $I_{n \text{ maks}}$ ) in je podana z enačbo (26).

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_{mf} \cdot I_{n \text{ maks}} \quad (26)$$

## 1.4 Vrednotenje harmonskega popačenja

Tokovno oziroma napetostno harmonsko popačenje se lahko ovrednoti posamično z relativno harmonsko vrednostjo oziroma celostno, na primer s celostnim ali skupnim faktorjem harmonskega popačenja [8].

### 1.4.1 Relativne harmonske vrednosti

Zaradi lažje ponazoritve vrednosti tokovnega oziroma napetostnega harmonskega popačenja na različnih napetostnih ravneh so velikosti harmonskih tokov in napetosti zapisane v relativni obliki. Relativna vrednost posamezne harmonske komponente se izračuna glede na vrednost osnovne harmonske komponente. Relativna vrednost harmonskega toka  $h$ -tega reda je določena z enačbo (27), relativna vrednost harmonske napetosti reda  $h$  pa z enačbo (28).

$$i_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (27)$$

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} \quad (28)$$

### 1.4.2 Skupno harmonsko popačenje

Skupno harmonsko popačenje (angl. total harmonic distortion – THD) se lahko izračuna za tok ( $THD_I$ ) in napetost ( $THD_U$ ) in je podano z enačbo (29) oziroma (30).

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{maks}}} I_h^2}}{I_1} \quad (29)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{maks}}} U_h^2}}{U_1} \quad (30)$$

Skupno harmonsko popačenje je predstavljeno kot razmerje med efektivno vrednostjo harmonskih tokov oziroma napetosti od 2. reda do  $h_{\text{maks}}$  in efektivno vrednostjo osnovne harmonske komponente toka oziroma napetosti. V standardih [7], [8] se skupno harmonsko popačenje računa do reda 40 oziroma  $h_{\text{maks}} = 40$ . Vrednost skupnega harmonskega popačenja podaja dobro orientacijo o dodatnih izgubah zaradi popačene napetosti na ohmskih bremenih oziroma dodatne izgube zaradi popačenega toka skozi reaktivni del bremena [1]. Povezava med efektivno vrednostjo toka oziroma napetosti in vrednostjo  $THD$  je lahko podana tudi z enačbo (31) oziroma (32).

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\text{max}}} I_h^2} = I_1 \cdot \sqrt{1 + (THD_I)^2} \quad (31)$$

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\text{max}}} U_h^2} = U_1 \cdot \sqrt{1 + (THD_U)^2} \quad (32)$$

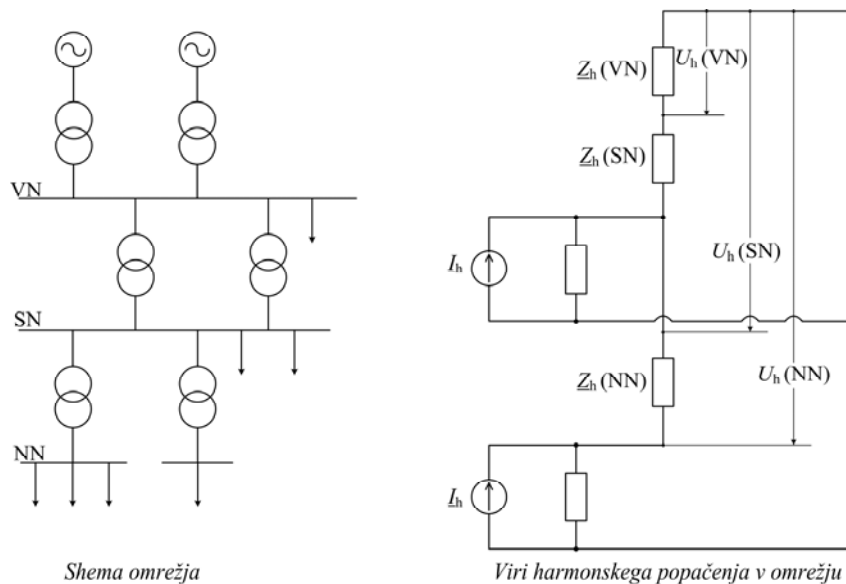
V določenih primerih je lahko vrednost skupnega harmonskega popačenja toka  $THD_I$  zavajajoča, saj je lahko pri majhnih vrednostih tokov vrednost  $THD_I$  zelo visoka, vendar ne predstavlja pomembnejšega problema za električni sistem. V tovrstnih primerih so sicer relativne harmonske vrednosti toka visoke, vendar so amplitude posameznih harmonskih komponent majhne. Zato je pogosto v uporabi faktor  $TDD$  (angl. total demand distortion), ki ovrednoti harmonsko popačenje toka glede na maksimalni bremenski tok, in ne glede na osnovno harmonsko komponento toka (33):

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L}, \quad (33)$$

kjer je  $I_L$  osnovna harmonska komponenta maksimalnega toka bremena, ki je izmerjen v točki priključitve porabnika v omrežje in je lahko določen na podlagi dolgotrajnih meritev ali je ocenjen glede na značilnost bremena.

### 1.5 Viri harmonskega popačenja

Harmonsko popačenje tvorijo običajno naprave z nelinearno napetostno oziroma tokovno karakteristiko [1]. Harmonsko popačenje sestoji v glavnem iz lihih harmonikov, kar pomeni, da so večkratniki osnovne frekvence 3, 5, 7 ..., harmoniki pa so simetrični glede na časovno os in simetralo polvala. Nelinearna bremena, ki proizvajajo harmonsko popačenje in s tem onesnažujejo elektroenergetsko omrežje, lahko v večini primerov obravnavamo kot tokovne harmonske vire [1], [9], [10], [11], ki povzročajo padce harmonskih napetosti na impedancah omrežja (slika 1.4).



Slika 1.4: Viri harmonskega popačenja v elektroenergetskem omrežju

Na harmonsko popačenje vplivajo tudi jalova bremena, kot na primer kondenzatorji za izboljšanje faktorja moči, kapacitivnost kablov ter posledično paralelne in serijske resonance.

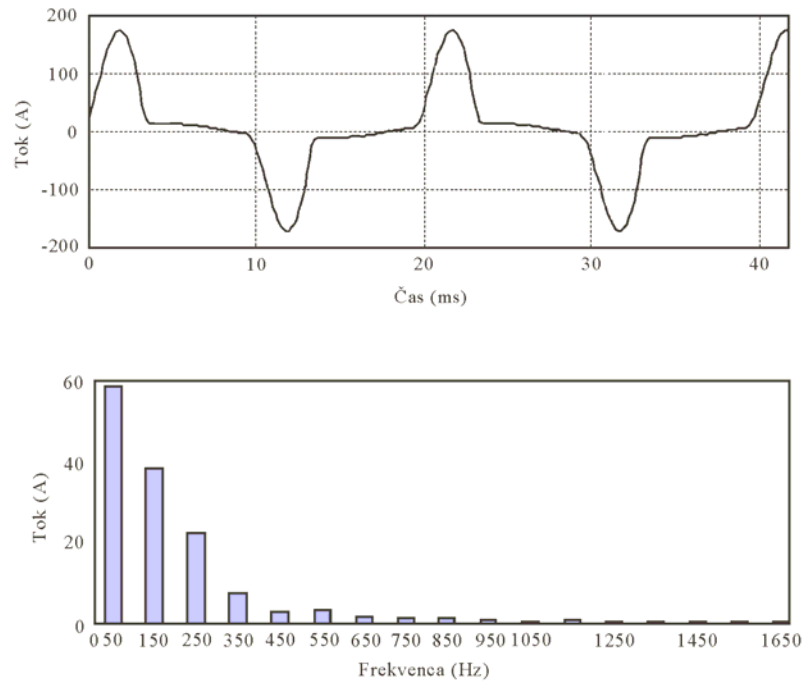
Pri tem lahko povzročajo povečanje harmonskega popačenja v točki omrežja, ki je zelo oddaljena od vira harmonskega popačenja.

### 1.5.1 Komerzialna bremena

Med komercialna bremena lahko štejemo poslovne zgradbe, trgovska središča, bolnišnice ipd., ki za razsvetljavo običajno uporabljajo sijalke s pripadajočo elektroniko, pri ogrevalnih in prezračevalnih sistemih uporabljajo frekvenčno krmiljene motorje, imajo visok delež enofaznih bremen, ki uporabljajo pretvorniške naprave, itd.. Lahko rečemo, da so komercialna bremena skupek majhnih bremen, ki povzročajo harmonsko popačenje. Pri tem lahko na primer zaradi medsebojnega vpliva različnih naprav prihaja med dvema napravama do seštevanja ali do kompenzacije posameznih tokovnih harmonskih komponent. Napetostno harmonsko popačenje je odvisno predvsem od skupnega tokovnega harmonskega popačenja in impedance tokokroga. Če pri komercialnih bremenih kondenzatorji za popravljanje faktorja moči običajno niso uporabljeni, je impedanca tokokroga določena predvsem z impedanco napajalnega transformatorja in z impedanco napajalnih vodov. Lastnosti značilnih komercialnih nelinearnih bremen so podane v nadaljevanju.

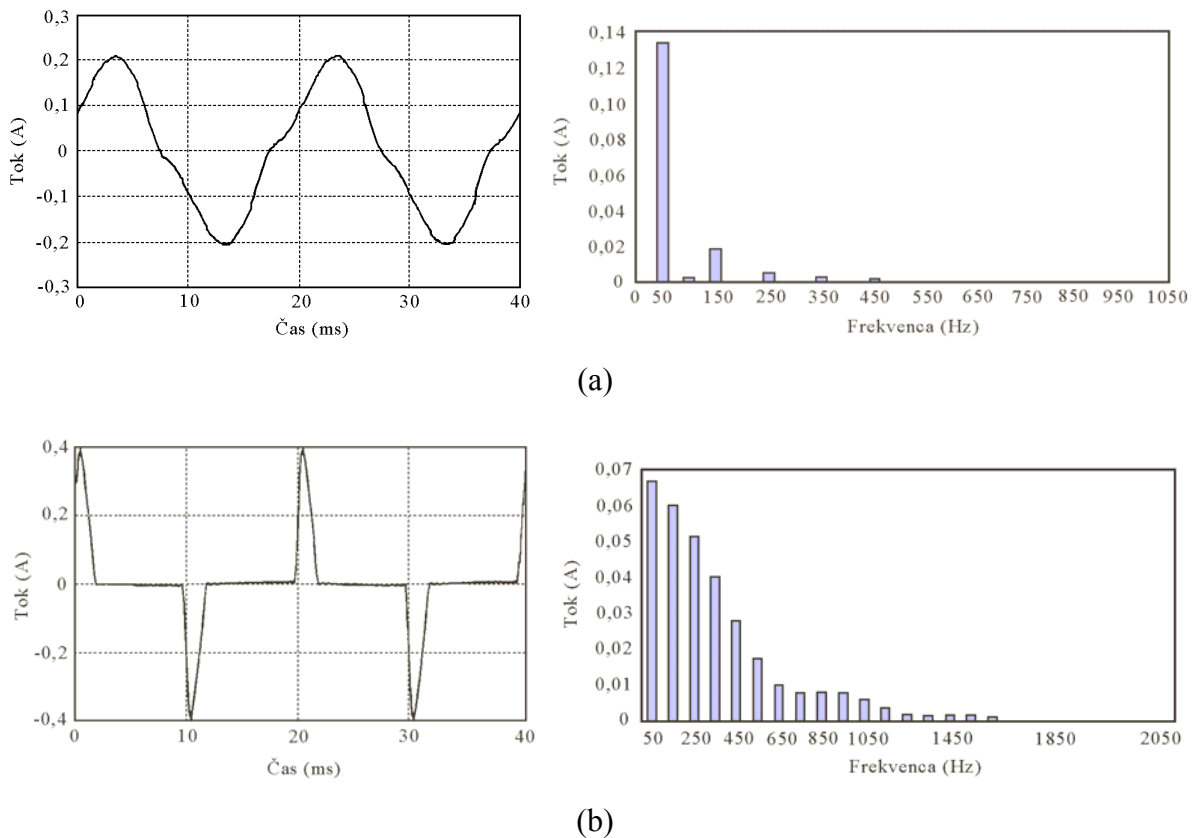
- o **Enofazni pretvorniški viri energije** so zelo razširjeni v različnih elektronskih napravah (na primer osebnih računalnikih, kopirnih strojih, tiskalnikih ...), ki za svoje delovanje uporabljajo pretvorniške naprave oziroma elemente elektronike. Lastnost tovrstnih naprav je, da imajo izrazito tretjo harmonsko komponento, ki v trifaznem sistemu z nevtralnimi vodniki običajno povzroča preobremenitve nevtralnega vodnika. Primer toka pretvorniško napajane bremena in spekter harmonskega popačenja sta na sliki 1.5.





Slika 1.5: Primer bremenskega toka enofaznega nelinearnega bremena in spekter harmonskega popačenja

- o **Sijalke** so tipična bremena v javnih stavbah, kjer razsvetljava predstavlja običajno med 40 in 60 odstotki celotnega bremena [1]. Pri tem je večji del razsvetljave izveden s sijalkami in običajno le manjši delež s svetili na žarilno nitko. Sijalke delujejo po principu razelektritve v plinu in potrebujejo visoko napetost, da pride do vžiga prevajanja skozi plin. Sijalke potrebujejo predstikalno napravo, ki omogoča vžig in stabilizacijo toka v fazi gorenja. V uporabi so elektromagnetne in elektronske predstikalne naprave, pri čimer imajo sijalke z elektronsko predstikalno napravo boljši izkoristek, vendar so precej večji vir harmonskega popačenja. Na sliki 1.6 a je primer toka sijalke z elektromagnetno predstikalno napravo. Tok sijalke z elektronsko predstikalno napravo, za katero je značilno zelo visoko skupno popačenje toka, je prikazan na sliki 1.6 b. Zaradi razmeroma velikega harmonskega popačenja so običajno tovrstna bremena enakomerno razporejena po vseh fazah in tvorijo uravnotežen sistem, zato je mogoče z ustrezno vezavo napajalnega transformatorja (trikot) preprečiti pretok predvsem tretje harmonske komponente v omrežje.



Slika 1.6: Tok in spekter harmonskega popačenja sijalke z elektromagnetno (a) in elektronsko (b) predstikalno napravo

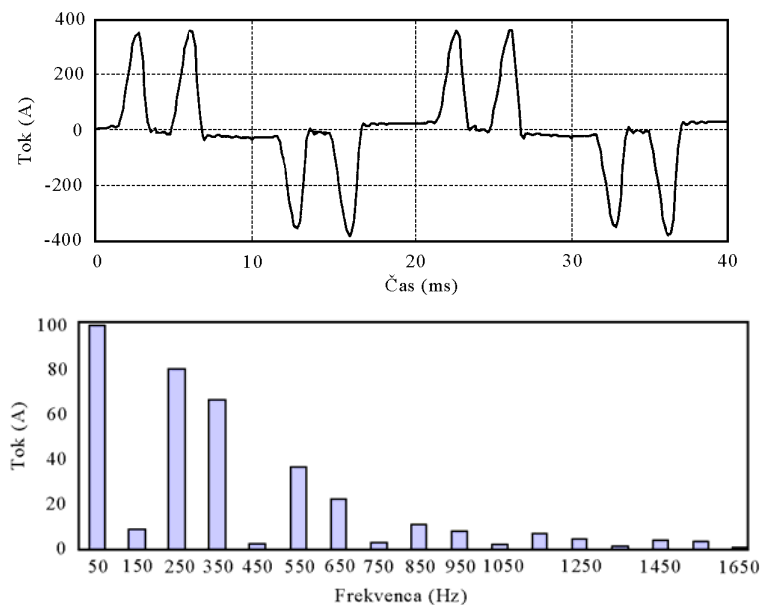
- ∂ **Frekvenčno krmiljeni motorji** se uporabljajo v javnih zgradbah v prezračevalnih in ogrevalnih sistemih, dvigalih ipd.. Motorji so krmiljeni preko pretvornika, ki pretvori izmenični vhodni signal v izhodni signal spremenljive amplitude in frekvence. Frekvenčno krmiljeni motorji se pogosto uporabljajo tudi v različnih industrijskih procesih.

### 1.5.2 Industrijska bremena

V sodobnih industrijskih procesih je velik del nelinearnih bremen, ki so vir tokovnega harmonskega popačenja, kar posledično povzroča tudi popačenje napetosti. V industriji so pogosto v uporabi tudi kompenzatorji jalove energije (kondenzatorji) za izboljšanje faktorja moči. Kompenzatorji sicer sami niso vir harmonskega popačenja, lahko pa povzročijo ojačenje harmonskega popačenja oziroma ustvarjajo resonančne razmere. Morebitne resonančne razmere lahko povzročijo pregrevanje motorjev in transformatorjev ter nepravilno

delovanje občutljivejše elektronske opreme. Industrijska bremena lahko s stališča harmonskega popačenja razdelimo v tri skupine: trifazne pretvorniške naprave, obločne naprave in naprave z magnetnim jedrom, ki pride v nasičenje.

- ∂ **Trifazni močnostni pretvorniki** se razlikujejo od enofaznih pretvornikov predvsem po tem, da ne generirajo tako velike tretje harmonske komponente toka. Trifazni pretvorniki so uporabljeni v različnih motorskih pogonih, kjer proizvedeno harmonsko popačenje ni konstantno, ampak je odvisno od obratovalne hitrosti oziroma navora. Primer toka oziroma spekter harmonskega popačenja motorskega pogona, napajane s trifaznim pretvornikom, ki deluje po principu pulzne širinske modulacije (angl. pulse width modulation – PWM) je prikazan na sliki 1.7.

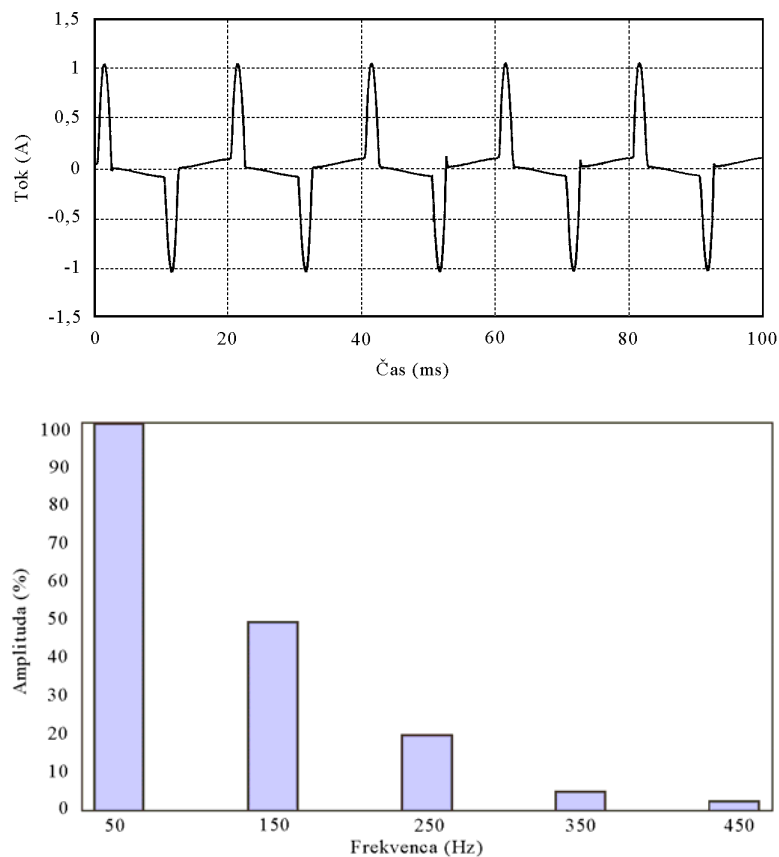


Slika 1.7: Tok in spekter harmonskega popačenja motorskega pogona, napajane s trifaznim PWM pretvornikom

- ∂ **Obločne naprave** vključujejo obločne peči, varilne aparate in tudi svetila, katerih delovanje temelji na razelektritvah (sijalke z elektromagnetno in elektronsko predstikalno napravo). Harmonsko popačenje, ki ga povzročajo, je posledica karakteristike električnega obloka (nelinearna  $U-I$  karakteristika električnega obloka), pri čimer je harmonski spekter obločnih naprav podoben, kot je prikazano na sliki 1.6 a. S pravilno vezavo transformatorja je pri trifaznih obločnih napravah mogoče omejiti tretjo harmonsko komponento. Kljub temu je

na primer pri trifaznih obločnih pečeh to težje izvedljivo zaradi pogoste neuravnotežene obremenitve predvsem v fazi taljenja.

- o **Naprave z magnetnim jedrom**, ki pride v nasičenje, vključujejo transformatorje in druge električne naprave z magnetnim jedrom. Harmonsko popačenje je v tem primeru posledica nelinearne  $U-I$  karakteristike oziroma magnetilne karakteristike. Primer magnetilnega toka in spekter harmonskega popačenja enofaznega oziroma trifaznega transformatorja v vezavi zvezda, z ozemljenim zvezdiščem, je prikazan na sliki 1.8. Tok vsebuje razmeroma veliko tretjo harmonsko komponento, ki jo je mogoče v uravnoteženem sistemu omejiti z ustrežno vezavo transformatorja (na primer trikot). Raven harmonskega popačenja zaradi nasičenja magnetnega jedra je v primerjavi z drugimi viri harmonskega popačenja (močnostnimi pretvorniki, obločnimi napravami) razmeroma nizka, vendar zaradi številčnosti tovrstnih naprav (na primer transformatorji v razdelilnih omrežjih) njihov vpliv ni zanemarljiv.



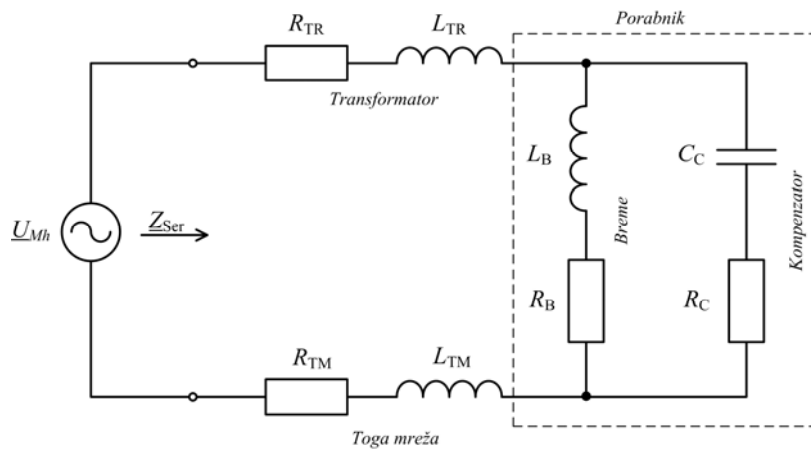
Slika 1.8: Magnetilni tok transformatorja in pripadajoči spekter harmonskega popačenja

## 1.6 Odziv omrežja na harmonsko popačenje

V elektroenergetskih omrežjih je odziv sistema na harmonsko popačenje in posamezne harmonske komponente enako pomemben kot viri harmonskega popačenja. Zato so zelo pomembne sistemske impedančne karakteristike, ki podajajo odvisnost impedance v določeni točki omrežja od različnih parametrov. Pri harmonskem popačenju je vsekakor najzanimivejša odvisnost impedance od frekvence oziroma obnašanje impedance pri posameznih harmonskih frekvencah. Iz impedančnih frekvenčnih karakteristik je mogoče razbrati resonančne točke, ki so s stališča harmonskega popačenja najbolj problematične in pomenijo potencialno poslabšanje razmer v omrežju [1], [12]. Elektroenergetska omrežja imajo v osnovi precej induktivni karakter, vendar se z vključitvijo kompenzatorjev za izboljšanje faktorja moči močno spremenita sistemska impedanca in njena odvisnost od frekvence. Omrežja, ki vsebujejo induktivne in kapacitivne komponente, imajo eno ali več resonančnih frekvenc. Če se resonančne frekvence ujamejo s frekvencami posameznih harmonikov, ki so prisotni v omrežju, se lahko te harmonske komponente povečajo. V glavnem lahko obravnavamo dva referenčna primera, in sicer je lahko vir harmonskega popačenja omrežje oziroma porabnik. V praksi sta običajno prisotna oba vira.

### 1.6.1 Impedančne frekvenčne karakteristike opazovane s strani omrežja

Pri impedančnih karakteristikah opazovanih s strani omrežja je nadomestni vir harmonskega popačenja predstavljen z napetostnim virom. Z napetostnim harmonskim virom predstavimo vpliv vseh harmonskih virov v omrežju na obravnavanega porabnika. Nadomestno shemo omrežja, ki ga napaja napetostni harmonski vir, prikazuje slika 1.9.

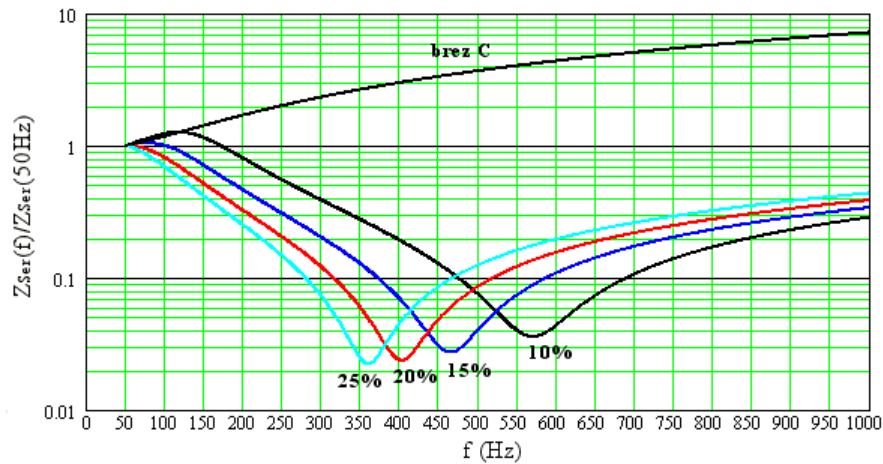


Slika 1.9: Nadomestna električna shema omrežja v primeru impedančne karakteristike opazovane z omrežne strani

Porabnik, ki vsebuje breme in kompenzator, tvori s stališča napetostnega vira serijsko vezavo z napajalnim transformatorjem in s togo mrežo. Če se resonančna frekvenca tokokroga ujame s harmonsko frekvenco, ki je prisotna v omrežju, bo porabnik zaznal povečano harmonsko popačenje, čeprav nima vira harmonskega popačenja. V resonančnih razmerah (pri serijski resonanci) je absolutna impedanca ( $|\underline{Z}_{Ser}|$ ), ki jo zazna omrežni vir, najnižja, zato lahko že razmeroma majhna harmonska komponenta napetosti, ki je prisotna v omrežju in katere frekvenca sovpada z resonančno frekvenco, povzroči velik harmonski tok. Impedanco, ki jo zazna napetostni harmonski vir na strani omrežja, izračunamo po enačbi (34).

$$\underline{Z}_{Ser} = \underline{Z}_{TM} + \underline{Z}_{TR} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} \quad (34)$$

Na sliki 1.10 je prikazana impedančna frekvenčna karakteristika za primer omrežja s harmonskim virom na strani omrežja in kompenzatorjem na strani porabnika. Velikost kompenzatorja je predstavljena z odstotno vrednostjo nazivne moči transformatorja, prek katerega je porabnik napajan.

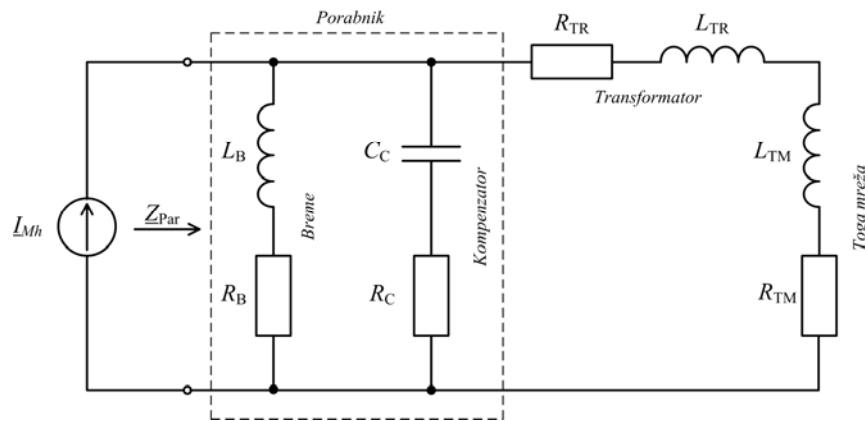


Slika 1.10: Relativna vrednost impedance, ki jo čuti napetostni harmonski vir v odvisnosti od frekvence

Kot je razvidno s slike 1.10, je resonančni pojav izrazitejši pri večjih vrednostih kompenzatorja (kondenzatorja), hkrati se s povečevanjem kompenzatorja resonančna točka pomika proti nižjim frekvencam.

## 1.6.2 Impedančne frekvenčne karakteristike opazovane s strani porabnika

Pri impedančnih frekvenčnih karakteristikah opazovanih s strani porabnika, je nadomestni vir harmonskega popačenja predstavljen s tokovnim virom. S stališča tokovnega harmonskega vira tvori porabnik, s svojo kompenzacijo, vzporedno oziroma paralelno vezavo z ekvivalentno impedanco omrežja (toga mreža, transformator). Nadomestno shemo omrežja, ki ga napaja tokovni harmonski vir na strani porabnika, prikazuje slika 1.11.

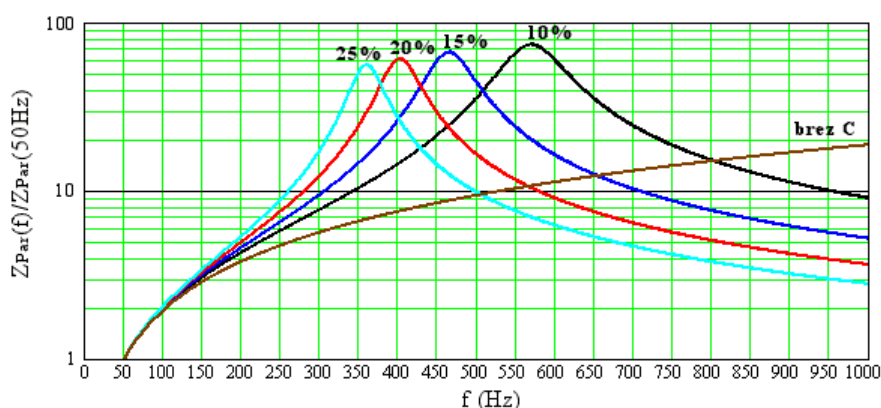


Slika 1.11: Nadomestna električna shema omrežja v primeru impedančne karakteristike opazovane s strani porabnika

Ker je harmonski vir predstavljen s tokovnim virom, je v resonančnih razmerah (pri paralelni resonanci) absolutna impedanca ( $|Z_{Par}|$ ) največja, zato lahko že razmeroma majhna harmonska komponenta toka, katere frekvenca sovpada z resonančno frekvenco, povzroči razmeroma veliko harmonsko komponento napetosti. Impedanco, na kateri harmonski tokovni vir povzroča padec harmonske napetosti, izračunamo z enačbo (35).

$$Z_{Par} = \frac{1}{\frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_{TM} + Z_{TR}}} \quad (35)$$

Na sliki 1.12 je podana impedančna karakteristika za konkretno omrežje s harmonskim virom in kompenzatorjem na strani porabnika. Velikost kompenzatorja je predstavljena z odstotno vrednostjo nazivne moči transformatorja, preko katerega je porabnik napajan.



Slika 1.12: Relativna vrednost impedance, ki jo čuti tokovni harmonski vir v odvisnosti od frekvence



## 1.7 Vpliv harmonskega popačenja

Harmonsko popačenje, ki se širi po električnem omrežju, predvsem negativno vpliva na naprave in njihovo delovanje. Vplive oziroma posledice v grobem delimo na trenutne in dolgotrajne:

- ∂ **Trenutni** vplivi oziroma posledice harmonskega popačenja se kažejo predvsem v slabem delovanju ter učinkovitosti naprav in v skrajnih primerih vodijo celo k izpadu naprav iz obratovanja. Med najboljčutljivejše naprave spadajo računalniki, regulacijske naprave in elektronska oprema, visoke amplitude harmonskih komponent pa lahko povzročijo tudi slabo delovanje zaščitnih relejev. Trenutni vpliv harmonskega popačenja se med drugim kaže tudi v obliki tresljajev motorjev in generatorjev in v motnjah v distribucijskih komunikacijskih sistemih.
- ∂ **Dolgotrajni** vplivi in posledice so predvsem termične narave, saj se dodatne izgube in pregrevanja kot posledice harmonskega popačenja kažejo v krajši življenjski dobi ali celo v okvarah izolacije večine elementov elektroenergetskega sistema in nanj priključenih naprav.

Posledice harmonskega popačenja v kablji in transformatorjih so predvsem dodatne izgube, ki povzročajo dodatno segrevanje, kar skrajšuje življenjsko dobo naprave in ima v končni fazi tudi negativni ekonomski učinek. Zaradi dodatnih izgub se zmanjša tudi največja možna obremenitev, s čimer se zmanjša faktor prenesene moči.

Podobne posledice harmonskega popačenja zasledimo tudi pri motorjih, generatorjih in drugih rotacijskih strojih, kjer so problematične predvsem harmonske komponente nižjih redov. Ob prisotnosti harmonskega popačenja se pojavijo vibracije in hrup, pogosto pa je kot posledica opazen tudi manjši izkoristek stroja.

Harmonsko popačenje nekoliko drugače vpliva na kondenzatorje oziroma kompenzatorje za izboljšanje faktorja moči, ki so običajno priključeni vzporedno porabnikom z močno induktivno komponento. Ker impedanca kondenzatorja s frekvenco pada pomeni, da kondenzator za harmonike predstavlja razmeroma majhno impedanco. Tako lahko že majhne harmonske popačitve napetosti povzročijo razmeroma visoke harmonske tokove skozi

kondenzator. Vplivi harmonskega popačenja na kondenzatorje se tako kažejo v povečanem toku skozi kondenzator, dodatnih izgubah in segrevanju, nepotrebnem delovanju zaščitnih elementov kompenzatorja in okvarah kondenzatorjev. Poleg tega kondenzator močno spremeni impedančne karakteristike omrežja, kar je posledično problem resonančnih razmer v omrežju.

Harmonsko popačenje (3. in ostale komponente ničnega sistema) so pogosto vzrok tudi za nepravilno delovanje zaščitnih naprav, do katerih prihaja zaradi premaknitve ničlišča in povečanja koničnih napetosti. Pri odklopnikih nastaja zaradi harmonskega popačenja večje stresanje, s čimer se podaljša čas odklopa, prihaja pa tudi do povratnih vžigov.

V električnih omrežjih z nevtralnim vodnikom prihaja pogosto do pregrevanja vodnika zaradi predvsem 3. harmonske komponente toka.

Harmonsko popačenje vpliva tudi na merilne sisteme v omrežju, kjer se pojavljajo napake pri merjenju električne energije. Prav tako se v okolici harmonsko popačenega električnega omrežja pojavljajo motnje v telefoniji. Napake pri delovanju zaradi harmonskega popačenja se na primer pojavljajo tudi pri digitalnih urah, televizijskih sprejemnikih, računalnikih, tiskalnikih itd..

## 1.8 Odpravljanje harmonskega popačenja

Problematika harmonskega popačenja je vse aktualnejša in čedalje pogostejše prisotna. Učinkovite rešitve za odpravljanje oziroma zmanjšanje harmonskega popačenja so nujne predvsem v primeru naprav, ki so prevelik vir harmonskega popačenja, ko so električne poti harmonskih tokov predolge, kar povzroča veliko harmonsko popačenje napetosti in interferenco v telefoniji, ter v primeru, kadar zaradi odziva sistema prihaja do nesprejemljivega ojačenja določenih harmonskih komponent [1]. V nadaljevanju je predstavljenih nekaj načinov zmanjšanja harmonskega popačenja:

- o **Zmanjševanje ravni proizvedenih harmonskih tokov** je običajno omejeno s samimi napravami, ki so vir harmonskega popačenja ter so običajno zelo drage in za določen proces nepogrešljive, zato njihova zamenjava ni ekonomsko opravičljiva. Kljub temu je z določenimi ukrepi (z ustrezno vezavo

---

transformatorja, dodajanjem serijske dušilke v PWM pogonske sisteme ipd.) mogoče izboljšati razmere, vendar so posegi v večino naprav (obločnih in večino pretvorniških) praktično neizvedljivi.

- o **Prilagoditev sistemskih impedanc** je v praksi najpogostejši način zmanjševanja harmonskega popačenja. Največkrat so vzrok za ojačenje harmonskega popačenja kompenzatorji, ki lahko v bližini nekaterih harmonskih frekvenc tvorijo, skupaj z induktivnostjo preostalega omrežja, resonanco. Zaradi tega je treba pri dimenzioniranju novih ali rekonstrukciji obstoječih kompenzatorjev izvesti ustrezne analize in meritve. Pri obstoječih kompenzatorjih težave z resonanco rešujejo z vgradnjo ustrezne dušilke v serijo s kondenzatorjem, s spremembo velikosti kondenzatorja, spremembo lokacije kondenzatorja ali kar z odstranitvijo kondenzatorja.
  
- o **Filtriranje harmonskega popačenja** je pogost ukrep za preprečitev pretoka harmonskega popačenja v omrežje. Najpogostejši je paralelni način priključitve harmonskih filtrov, ki poleg filtriranja harmonskih tokov kompenzirajo tudi jalovo energijo in prispevajo k izboljšanju faktorja moči. Razlikujemo dve skupini filtrov, in sicer pasivne in aktivne. Pasivni so zgrajeni iz pasivnih električnih elementov (upor, kondenzator in dušilka). Najbolje jih je priključiti v točko, kjer se kratkostična moč sploh ne ali pa le malo spreminja (ne prihaja do resonanc med filtrom in sistemom), hkrati pa mora biti električna pot harmonskih tokov čim krajša, kar pomeni, da morajo biti filtri nameščeni čim bližje viru harmonskega popačenja. Priključitev filtrov je lahko serijska ali paralelna, najpomembnejša podatka o filtru pa sta njegova impedanca in pasovna širina. Koncept serijske priključitve je paralelni resonančni krog, ki ima zelo visoke impedance pri uglasenih frekvencah in tako izbranim harmonskim komponentam toka preprečuje prehod skozi filter. Vgradnja tovrstnih filtrov je precej draga, saj morajo biti vse komponente filtra dimenzionirane za maksimalni tok. Večinoma so filtri priključeni paralelno in uporabljajo serijski resonančni tokokrog, ki ima za izbrane harmonske komponente zanemarljivo impedanco v primerjavi s sistemsko harmonsko impedanco, kar pomeni, da večina harmonskega toka teče skozi filter. Prav tako je mogoča kombinacija serijsko in paralelno priključenega filtra, kjer serijsko priključena veja prepreči prehod harmonskega toka, medtem ko jih

paralelno priključena veja spelje v zemljo. Kombinacija ni primerna za filtriranje toka nižjih harmonskih redov, saj bi lahko velika impedanca serijske veje povzročila prevelik padec napetosti osnovne harmonske komponente. Pasivni filtri imajo ohmski značaj pri uglaseni frekvenci, pri nižji frekvenci od uglasene imajo kapacitivni značaj, pri višji pa induktivnega. Največkrat uporabljene vrste pasivnih filtrov so enojno uglaseni filtri (filtrirajo eno harmonsko frekvenco), enojno uglaseni visokoprepustni filtri, dvojno uglaseni filtri, dvojno uglaseni visoko prepustni filtri, trojno uglaseni filtri in nepretrgano uglaseni filtri. Če je treba filtrirati več harmonskih tokov in široko frekvenčno območje, bi bilo potrebnih več vej pasivnih filtrov, kar pa povečuje prostorske zahteve, zaradi strogih zahtev glede filtriranja harmonikov pa se strmo zvišuje tudi cena pasivnih filtrov. V takih primerih se uporabljajo aktivni filtri, ki jih sestavljajo merilna enota harmonskega toka, krmilni sistem, zaščitni in nadzorni sistem, močnostni pretvornik, visokofrekvenčni transformator, naprava za preprečevanje prenapetosti in sklopna oprema. Prednosti aktivnih filtrov so večja učinkovitost, fleksibilnost in ekonomičnost v primeru množice različnih harmonskih komponent ter varnost pred resonanco med filtrom in preostalim sistemom. Pri tem so zelo uporabni tudi za kompenzacijo drugih parametrov kakovosti električne energije ter kompenzacijo jalove moči, vendar zahtevajo precej zapleten zaščitni in krmilni sistem.

## 1.9 Standardi na področju harmonskega popačenja

Če govorimo o nesprejemljivem harmonskem popačenju napetosti ali toka ter o določanju odgovornosti za popačenje, je treba definirati tudi standarde, ki postavljajo omejitve in zahteve glede harmonskega popačenja. V Sloveniji veljaven standard na področju harmonskega popačenja je standard SIST EN 50160 [8], ki je predstavljen v nadaljevanju. Predstavljeno je tudi tehnično poročilo IEC 61000-3-6 [13], [15], in sicer del, ki se nanaša na določanje emisij harmonskega popačenja (angl. harmonic emission level), na podlagi katerih lahko ocenimo tudi dejanski vpliv oziroma odgovornost obravnavanega porabnika za harmonsko popačenje na priključnem mestu.

### 1.9.1 SIST EN 50160

V Sloveniji je veljaven standard s področja harmonskega popačenja standard SIST EN 50160, ki določa meje posameznih harmonskih komponent v srednjenapetostnih (SN) in nizkonapetostnih (NN) omrežjih. Standard določa, da mora biti ob običajnih obratovalnih pogojih, v katerem koli tednu, 95 odstotkov vseh deset minutnih srednjih efektivnih vrednosti posameznih harmonskih napetosti enakih ali manjših od vrednosti, podanih v tabeli 1.1 [8]. V tabeli 1.1 so navedene vrednosti posameznih harmonskih komponent napetosti za NN in SN omrežja, na predajnem mestu, za rede harmonikov do 25, ki so podani v odstotkih nazivne napetosti  $U_n$  za NN in v odstotkih dogovorjene napajalne napetosti za SN omrežja. Veljati mora tudi, da mora biti  $THD_U$  napajalne napetosti, vključujoč vse harmonike do reda 40, manjši ali enak osmim odstotkom, pri čimer je omejitev do reda 40 dogovorjena.

*Tabela 1.1: Maksimalne vrednosti posameznih harmonskih komponent napetosti za NN in SN omrežja*

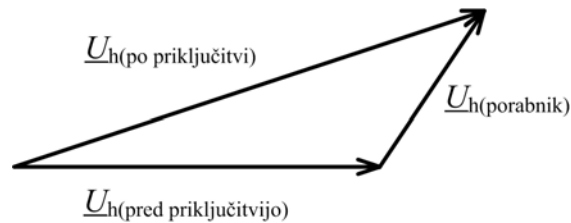
Lihi harmoniki				Sodi harmoniki	
Niso večkratniki števila 3		Večkratniki števila 3			
Red harmonika	$u_h$ (%)	Red harmonika	$u_h$ (%)	Red harmonika	$u_h$ (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	od 6 do 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Opomba: V tabeli niso podane vrednosti za red harmonikov nad 25; ti so običajno majhni, vendar zaradi resonančnih pojavov zelo nepredvidljivi.

### 1.9.2 IEC 61000-3-6

Tehnično poročilo IEC 61000-3-6 [13] obravnava omejitve in zahteve glede harmonskega popačenja, ki ga povzročajo bremena v srednjenapetostnih (SN) in visokonapetostnih (VN) omrežjih. V standardu je podana definicija tako imenovanih emisij harmonskega popačenja (angl. harmonic emission level). Emisija harmonskega popačenja porabnika oziroma bremena je definirana kot harmonska napetost ali tok, ki bi ga povzročalo obravnavano breme, če v omrežju ne bi bilo priključeno nobeno drugo breme, ki bi povzročalo harmonsko popačenje. Določanje emisij harmonskega popačenja je pomembno, saj je le tako mogoče omejiti

harmonsko popačenje na ustrezno raven, ki ne presega načrtovanih oziroma predpisanih mej. Pri tem je pomembno določiti tudi dejansko odgovornost oziroma vpliv, ki ga ima določen porabnik na harmonsko popačenje v omrežju. V obravnavi je tudi nova posodobljena izdaja tehničnega poročila IEC 61000-3-6 [15], ki določa emisijo harmonskega popačenja kot amplitudo vektorja harmonske napetosti (toka), ki je posledica priključitve problematičnega bremena v obravnavano točko omrežja. Predlagan pristop je ponazorjen z vektorskim diagramom na sliki 1.13.



*Slika 1.13: Vektor harmonske napetosti zaradi priključitve porabnika ( $\underline{U}_{h(\text{porabnik})}$ ) je določen z razliko vektorjev harmonske napetosti pred priključitvijo porabnika oziroma problematičnega bremena v omrežje in po njej*

Vektor harmonske napetosti  $\underline{U}_{h(\text{pred priključitvi})}$  je povzročen s strani vseh harmonskih virov v omrežju in predstavlja razmere pred priključitvijo obravnavanega bremena oziroma porabnika. Vektor harmonske napetosti  $\underline{U}_{h(\text{po priključitvi})}$  predstavlja razmere po priključitvi porabnika. Indeks  $h$  predstavlja red harmonske komponente. Če priključitev bremena oziroma porabnika prispeva k povečanju harmonskega popačenja, mora biti emisija harmonskega popačenja v mejah, ki so določene v standardih.

## 2 DOLOČANJE ODGOVORNOSTI ZA HARMONSKO POPAČENJE

Z naraščajočim deležem naprav, ki so vir harmonskega popačenja v električnih omrežjih, postaja harmonsko popačenje pomemben dejavnik pri zagotavljanju ustrezne kakovosti električne energije odjemalcem oziroma porabnikom. Omejitve, ki se nanašajo na harmonsko popačenje, so sicer določene v različnih standardih [8], [14], [13], vendar za zdaj distribucijska podjetja težko vplivajo na porabnike, ki presegajo meje harmonskega popačenja. Edina možnost je izklop takega porabnika iz električnega omrežja, vendar je tovrsten ukrep nesmiseln in nezaželen. Zaradi tega se pojavlja ideja o pristopu, podobnemu že uveljavljenemu načinu obračunavanja slabega faktorja moči, ki bi stroškovno ovrednotil tudi odgovornost porabnika za harmonsko popačenje [6], [16]. Tovrsten pristop predstavlja dva pomembna izziva oziroma se zastavlja vprašanje, kako ločiti in ovrednotiti delež odgovornosti porabnika oziroma omrežja za harmonsko popačenje ter pri tem upoštevati tudi medsebojni vpliv napajalnega in porabniškega omrežja. Glede na težavnost določanja izvorov harmonskega popačenja [17] in odgovornosti je v velikih sistemih z raznovrstnimi nelinearnimi bremenmi praktično nemogoče dobiti popolno informacijo o harmonskem popačenju brez uporabe sočasnih meritev v več točkah omrežja. Metode, ki temeljijo na meritvah v več točkah omrežja [5], [18]–[21] pa so zahtevne in precej drage rešitve [22], zato se pojavlja potreba po preprostejših pristopih, ki temeljijo na meritvah v eni točki omrežja in so precej primernejši za praktično uporabo. V literaturi je bilo predstavljenih kar nekaj metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje v eni točki omrežja oziroma točki priključitve porabnika v omrežje (angl. point of common coupling), vendar zadovoljivega rezultata še ni. Metoda smeri pretoka harmonske moči, ki je bila največkrat uporabljena v industriji [23], [24], je dokazano nezanesljiva in v določenih primerih pokaže napačne rezultate [25]. Metode, ki temeljijo na stikalnih manevrih problematičnih bremen in ugotavljanju odgovornosti na podlagi dodatnih elementov (kondenzatorji) so zelo nepraktične in pogosto neizvedljive [26]. Obstaja več metod, ki temeljijo na Nortonovem ekvivalentnem tokokrogu, kjer so harmonski viri določeni na podlagi podatkov o impedancah na strani porabnika in omrežja [27]–[32]. Podatki o impedancah so pogosto nedostopni in težko določljivi, zato so tovrstne metode za praktično uporabo neprimerne. Nekaj metod sicer pokaže dobre in obetajoče rezultate [32]–[34], vendar težave pogosto povzročata kompleksnost metode in njena implementacija v prakso, hkrati pa določene metode ne pokažejo ustreznih rezultatov v primeru posebnih stanj v omrežju (na primer resonančnih).

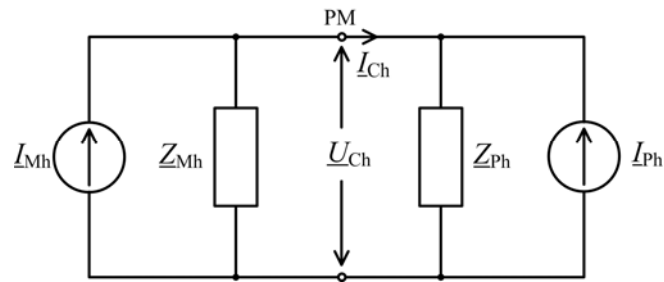
Metoda, ki se je v teoriji izkazala kot pravilna, je tudi metoda harmonskih vektorjev in temelji na Nortonovem ekvivalentnem tokokrogu [31]. Metoda ima precej praktičnih pomanjkljivosti, saj zahteva poznavanje dejanskih impedanc na strani porabnika in omrežja. Doktorska naloga se osredotoča predvsem na omenjeno metodo in njeno modifikacijo, kjer je velik poudarek na poenostavitvi metode in s tem primernosti za praktično uporabo. Poenostavitev metode harmonskih vektorjev temelji predvsem na preprostemu določanju impedanc, zato so v ta namen predlagane referenčne impedance. Metodologijo metode harmonskih vektorjev je mogoče uporabiti tudi pri določanju emisij harmonskega popačenja v skladu s tehničnim poročilom IEC 61000-3-6, kjer se prav tako zahteva poznavanje dejanske impedance na strani omrežja. V nadaljevanju so opisane omenjene metode, pri čemer je zaradi podobnosti metod podrobno opisana le metoda harmonskih vektorjev z upoštevanjem referenčnih impedanc. V rezultatskem delu doktorske naloge je predstavljena tudi primerjava rezultatov posameznih metod.

## 2.1 Osnovna metoda harmonskih vektorjev

Metodo harmonskih vektorjev (MHV) 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 preostalo omrežje.

Osnovna metoda harmonskih vektorjev temelji na Nortonovem teoremu, kjer točko priključitve porabnika v omrežje predstavimo z Nortonovim ekvivalentnim tokokrogom (slika 2.1) [31]. Ekvivalentni tokokrog je sestavljen iz dveh tokovnih virov harmonskega popačenja, in sicer harmonskega vira na strani omrežja  $\underline{I}_{Mh}$  in harmonskega vira porabnika  $\underline{I}_{Ph}$  ter harmonskih impedanc posameznih strani  $\underline{Z}_{Mh}$  oziroma  $\underline{Z}_{Ph}$ . Tokokrog je uporaben za različne harmonske frekvence, pri čemer se spremeni le vrednost harmonskega reda  $h$ . Metoda razdeli posamezno harmonsko komponento toka  $\underline{I}_{Ch}$  ali napetosti  $\underline{U}_{Ch}$  na priključnem mestu (PM) oziroma točki priključitve porabnika v omrežje v komponento porabnika in komponento dobavitelja oziroma omrežja.



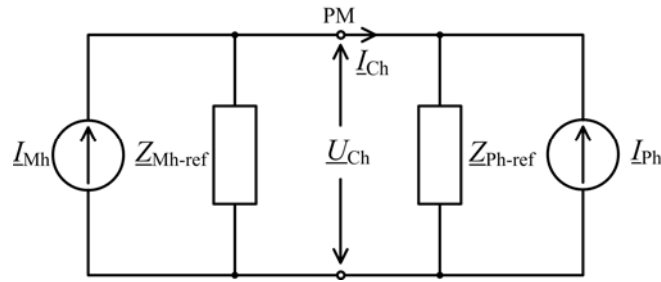


Slika 2.1: Nortonov ekvivalentni tokokrog pri metodi harmonskih vektorjev

Indeksi, uporabljeni na sliki 2.1, so M za dobavitelja oziroma omrežje, P za porabnika oziroma odjemalca in C za točko merjenja oziroma veličine v priključni točki porabnika na omrežje. Izračun odgovornosti za harmonsko popačenje na priključnem mestu 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 je največja 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, ki so predlagane v okviru doktorske naloge. Metoda je podrobno predstavljena v nadaljevanju.

## 2.2 Metoda harmonskih vektorjev z uporabo referenčnih impedanc

Metoda harmonskih vektorjev temelji na Nortonovem ali Theveninovem ekvivalentnem tokokrogu, kjer so dejanske impedance nadomeščene z referenčnimi. Pri izračunu odgovornosti za harmonsko popačenje toka izhajamo iz Nortonovega ekvivalentnega tokokroga (slika 2.2).



Slika 2.2: Nortonov ekvivalentni tokokrog pri metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami

Nortonov ekvivalentni tokokrog je sestavljen iz porabniškega tokovnega vira harmonskega popačenja  $I_{Ph}$ , tokovnega harmonskega vira na strani omrežja  $I_{Mh}$  in referenčnih impedanc porabnika  $Z_{Ph-ref}$  oziroma dobavitelja  $Z_{Mh-ref}$ . Indeksi, uporabljeni na sliki 2.2 in na vseh slikah v nadaljevanju, so M za dobavitelja oziroma omrežje, P za porabnika oziroma odjemalca in C za točko merjenja oziroma izmerjene veličine na mestu priključitve porabnika v omrežje. Ekvivalentni tokokrog velja za različne harmonske frekvence, pri čemer se spremeni le vrednost harmonskega reda  $h$ .

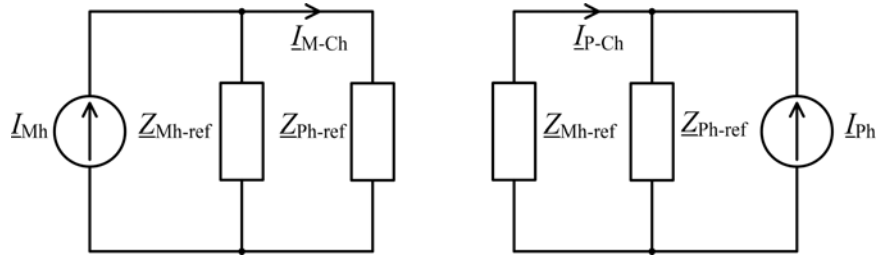
Določanje prispevkov posamezne strani k harmonskemu popačenju na priključnem mestu temelji na meritvi toka in napetosti v točki priključitve opazovanega porabnika v omrežje. Pri tem poleg amplitude merimo tudi fazni kot med tokom  $I_{Ch}$  in napetostjo  $U_{Ch}$ . V fazi predstavitve metode predpostavimo, da so referenčne impedance porabnika in dobavitelja oziroma omrežja znane. Glede na sliko 2.2 sta harmonski tok  $I_{Ch}$  in harmonska napetost  $U_{Ch}$  na PM odvisna od toka harmonskega vira na strani omrežja  $I_{Mh}$  in toka harmonskega vira na strani porabnika  $I_{Ph}$ . Tokovna harmonska vira na obeh straneh lahko izračunamo iz izmerjenih vrednosti  $I_{Ch}$  in  $U_{Ch}$  na PM:

$$I_{Mh} = \frac{U_{Ch}}{Z_{Mh-ref}} + I_{Ch}, \quad (36)$$

$$I_{Ph} = \frac{U_{Ch}}{Z_{Ph-ref}} - I_{Ch}. \quad (37)$$

Ko poznamo tokovna harmonska vira, se posvetimo računanju prispevkov k tokovnemu harmonskemu popačenju  $I_{Ch}$ . V skladu s principom superpozicije je tok vsota posameznih prispevkov vseh virov v omrežju. Na podlagi superpozicije lahko izračunamo harmonska

tokova, ki tečeta skozi priključno mesto zaradi omrežja  $\underline{I}_{M-Ch}$  in porabnika  $\underline{I}_{P-Ch}$ . Princip superpozicije je prikazan na sliki 2.3, kjer je harmonski tok zaradi porabnika  $\underline{I}_{P-Ch}$  določen kot izmerjeni tok v primeru, ko je prisoten tokovni harmonski vir samo na strani porabnika. Podobno lahko določimo tudi harmonski tok zaradi omrežja  $\underline{I}_{M-Ch}$ , ki je določen kot harmonski tok, ki bi ga izmerili, če bi bil prisoten samo tokovni harmonski vir na strani omrežja.



Slika 2.3: Nortonov ekvivalentni tokokrog razdeljen po principu superpozicije

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. Če harmonske vire poznamo (na primer na podlagi meritev), je uporaba metode superpozicije za določanje prispevkov harmonskih virov utemeljena [35].

Harmonski tok zaradi omrežja  $\underline{I}_{M-Ch}$  in harmonski tok zaradi porabnika  $\underline{I}_{P-Ch}$  sta določena z enačbo (38) oziroma (39).

$$\underline{I}_{M-Ch} = \frac{\underline{Z}_{Mh-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{I}_{Mh} \quad (38)$$

$$\underline{I}_{P-Ch} = -\frac{\underline{Z}_{Ph-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{I}_{Ph} \quad (39)$$

Z vektorsko vsoto harmonskih tokov, izračunanih z enačbama (38) in (39), dobimo po enačbi (40) ravno fazor izmerjenega harmonskega toka na priključnem mestu  $\underline{I}_{Ch}$ .

$$\underline{I}_{Ch} = \underline{I}_{M-Ch} + \underline{I}_{P-Ch} \quad (40)$$

Absolutno vrednost izmerjenega harmonskega toka na priključnem mestu  $\underline{I}_{Ch}$  lahko poleg tega razstavimo na skalarni prispevek omrežja in porabnika, kot prikazuje slika 2.4. Skalarni

prispevek omrežja  $I_{Mhf}$  k harmonskemu toku  $I_{Ch}$  dobimo tako, da fazor harmonskega toka zaradi omrežja  $I_{M-Ch}$  projiciramo na fazor izmerjenega harmonskega toka v točki priključitve  $I_{Ch}$ . Podobno določimo tudi skalarni prispevek porabnika  $I_{Phf}$ , le da zdaj na fazor izmerjenega toka  $I_{Ch}$  projiciramo fazor harmonskega toka zaradi porabnika  $I_{P-Ch}$ .



Slika 2.4: Prispevki porabnika in omrežja k harmonskemu popačenju toka na priključnem mestu porabnika

Skalarna prispevka izračunamo na podlagi enačb (41) in (42), pri čemer so  $\varphi_{I_{M-Ch}}$  fazni kot harmonskega toka zaradi omrežja  $I_{M-Ch}$ ,  $\varphi_{I_{P-Ch}}$  fazni kot harmonskega toka zaradi porabnika  $I_{P-Ch}$  in  $\varphi_{I_{Ch}}$  fazni kot izmerjenega harmonskega toka v točki priključitve  $I_{Ch}$ .

$$I_{Mhf} = |I_{M-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{I_{M-Ch}} - \varphi_{I_{Ch}}) \quad (41)$$

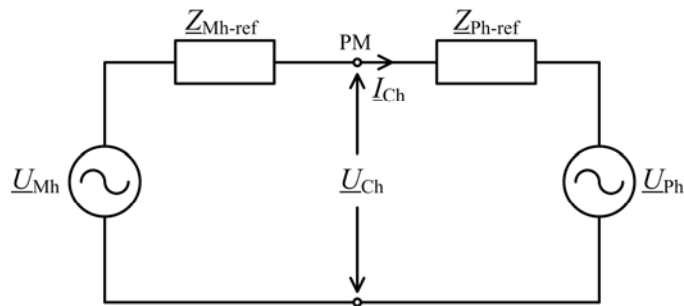
$$I_{Phf} = |I_{P-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{I_{P-Ch}} - \varphi_{I_{Ch}}) \quad (42)$$

Na sliki 2.4 sta prikazana primera delitve izmerjenega harmonskega toka na prispevek omrežja in prispevek porabnika, pri čemer je prispevek porabnika enkrat pozitiven, drugič pa negativen. Na sliki 2.4 je prikazano, da je absolutna vrednost izmerjenega harmonskega toka  $|I_{Ch}|$  na priključnem mestu enaka algebraični vsoti skalarnih prispevkov porabnika in omrežja.

$$|I_{Ch}| = I_{Mhf} + I_{Phf} \quad (43)$$

Komponenti  $I_{Mhf}$  in  $I_{Phf}$  je tako mogoče uporabiti za določitev ravni prispevkov na porabniški in omrežni oziroma dobaviteljevi strani. Obe komponenti sta skalarni vrednosti in imata lahko nasprotni predznake, kar je prikazano tudi na prejšnjih slikah. Če imata enak predznak, se seštevata v obliko  $|I_{Ch}|$ , v primeru nasprotnih predznakov pa ima prispevek z negativnim predznakom učinek zmanjševanja oziroma kompenzacije harmonskega toka v točki priključitve porabnika v omrežje.

Poleg računanja prispevkov dobavitelja in porabnika k harmonskemu toku na priključnem mestu porabnika v omrežje  $\underline{I}_{Ch}$ , 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 2.5), kjer sta omrežje in porabnik ponazorjena z napetostnima harmonskima viroma  $\underline{U}_{Mh}$  in  $\underline{U}_{Ph}$  ter s pripadajočima referenčnima impedancama  $\underline{Z}_{Mh-ref}$  in  $\underline{Z}_{Ph-ref}$  pri harmonskem redu  $h$ .



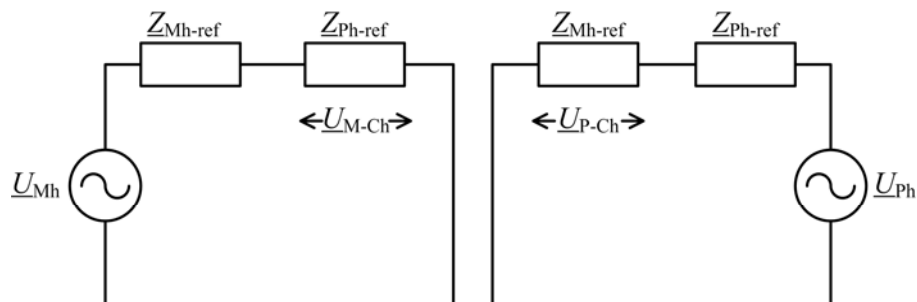
Slika 2.5: Theveninov ekvivalentni tokokrog pri računanju prispevkov k napetostnemu harmonskemu popačenju

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

$$\underline{U}_{Mh} = \underline{U}_{Ch} + \underline{I}_{Ch} \cdot \underline{Z}_{Mh-ref} \quad (44)$$

$$\underline{U}_{Ph} = \underline{U}_{Ch} - \underline{I}_{Ch} \cdot \underline{Z}_{Ph-ref} \quad (45)$$

Tudi v tem primeru uporabimo princip superpozicije, kjer Theveninov ekvivalentni tokokrog razdelimo in določimo harmonsko napetost, ki je posledica prisotnosti porabnika oziroma omrežja. Princip superpozicije pri določanju napetostnih harmonskih prispevkov je prikazan na sliki 2.6.



Slika 2.6: Theveninov ekvivalentni tokokrog razdeljen po principu superpozicije

Z enačbama (46) in (47) izračunamo harmonski napetosti na priključnem mestu zaradi omrežja  $\underline{U}_{M-Ch}$  oziroma porabnika  $\underline{U}_{P-Ch}$ .

$$\underline{U}_{M-Ch} = \frac{\underline{Z}_{Ph-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{U}_{Mh} \quad (46)$$

$$\underline{U}_{P-Ch} = \frac{\underline{Z}_{Mh-ref}}{\underline{Z}_{Mh-ref} + \underline{Z}_{Ph-ref}} \cdot \underline{U}_{Ph} \quad (47)$$

Nadaljnji postopek računanja prispevkov je podoben kot v primeru harmonskih tokov. Vektorska vsota izračunanih harmonskih napetosti  $\underline{U}_{M-Ch}$  in  $\underline{U}_{P-Ch}$  je ravno fazor izmerjene harmonske napetosti v točki priključitve porabnika  $\underline{U}_{Ch}$ .

$$\underline{U}_{Ch} = \underline{U}_{M-Ch} + \underline{U}_{P-Ch} \quad (48)$$

Skalarne prispevke omrežja in porabnika k harmonskemu popačenju napetosti na priključnem mestu dobimo na podoben način kot v primeru tokovnega harmonskega popačenja (slika 2.4). Skalarni prispevek omrežja  $U_{Mhf}$  k izmerjeni harmonski napetosti  $\underline{U}_{Ch}$  na PM izračunamo z enačbo (49), ki predstavlja projekcijo fazorja harmonske napetosti zaradi omrežja  $\underline{U}_{M-Ch}$  na fazor izmerjene harmonske napetosti  $\underline{U}_{Ch}$ . Prispevek porabnika  $U_{Phf}$  k izmerjeni harmonski napetosti  $\underline{U}_{Ch}$  dobimo z enačbo (50), ki projicira fazor harmonske napetosti zaradi porabnika  $\underline{U}_{P-Ch}$  na fazor izmerjene harmonske napetosti  $\underline{U}_{Ch}$ .

$$U_{Mhf} = |\underline{U}_{M-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{U_{M-Ch}} - \varphi_{U_{Ch}}) \quad (49)$$

$$U_{Phf} = |\underline{U}_{P-Ch}| \cdot \cos(\varphi_{U_{P-Ch}} - \varphi_{U_{Ch}}) \quad (50)$$

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  $\varphi_{U_{Ch}}$ .

Podobno kot pri tokovnem harmonskem popačenju, je tudi v tem primeru absolutna vrednost izmerjene harmonske napetosti  $|\underline{U}_{Ch}|$  na priključnem mestu enaka algebraični vsoti skalarnih prispevkov porabnika in omrežja.

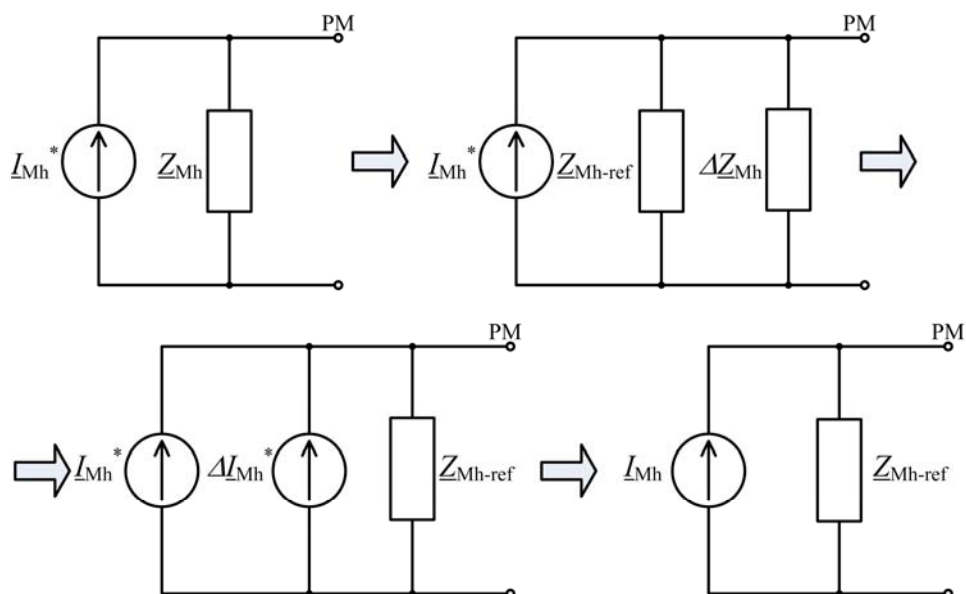
$$|\underline{U}_{Ch}| = U_{Mhf} + U_{Phf} \quad (51)$$

Fazni koti običajno predstavljajo fazno razliko do fazorja harmonske napetosti v točki priključitve  $\underline{U}_{Ch}$ , za katero privzamemo, da ima fazni kot 0 električnih stopinj oziroma ji tak fazni kot določi že merilna oprema.

### 2.2.1 Referenčne impedance

Metoda harmonskih vektorjev, kjer so upoštevane dejanske impedance, ne rešuje problema neustreznih oziroma spreminjajočih se impedanc, ki lahko prispevajo k prekoračitvi omejitev harmonskega popačenja. V praksi je največji vpliv kondenzatorjev, ki za harmonike pomenijo zelo nizko impedanco, lahko pa so tako na strani dobavitelja kot na strani porabnika. Kot je bilo že povedano, kondenzatorji sami niso vir harmonskega popačenja, vendar lahko prispevajo k ojačenju harmonskega popačenja.

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. Postopek pretvorbe odstopanja dejanske impedance na strani omrežja  $\Delta Z_{Mh}$  od referenčne vrednosti  $Z_{Mh-ref}$  v ekvivalentni tokovni harmonski vir  $\Delta I_{Mh}$ , je prikazan na sliki 2.7.



Slika 2.7: Postopek pretvorbe odstopanja dejanske impedance  $Z_{Mh}$  od referenčne vrednosti  $Z_{Mh-ref}$  v ekvivalentno spremembo harmonskega vira

Podobno velja tudi za spremembo impedance na strani porabnika, kjer se odstopanje dejanske impedance porabnika od referenčne vrednosti pretvori v ekvivalentni harmonski vir.

V realnosti se spreminjata impedanci tako na strani omrežja kot na strani porabnika. Za praktično implementacijo metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami je pomembno, da je določanje referenčnih impedanc preprosto, da so na primer referenčne impedance določene samo na podlagi meritev na mestu priključitve porabnika v omrežje. Medtem ko je impedance na strani omrežja običajno mogoče 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 iz lastnega transformatorja, je na strani omrežja impedanca v največji meri določena z impedanco tega transformatorja. Impedanca napajalnega transformatorja, ki je točka priključitve porabnika v omrežje, predstavlja več kot 90 odstotkov vrednosti impedance omrežja. Ker so osnovni podatki transformatorja običajno dostopni, lahko na podlagi teh ocenimo impedanco omrežja. Iz navedenega sledi, da lahko za referenčno impedanco na strani omrežja predlagamo impedanco napajalnega transformatorja, ki ji prištejemo še kratkostično impedanco omrežja. Vrednost referenčne impedance na strani omrežja lahko za določeno točko v omrežju podajo tudi distribucijska podjetja, kar je pogosta praksa, na primer pri vgradnji harmonskih filtrov [31]. Pri tem je lahko referenčna impedanca omrežja tudi predmet pogodbenih vrednosti, kar pomeni, da so distribucijska podjetja spodbujena k podajanju vrednosti referenčne impedance, ki je blizu dejanski vrednosti, s čimer se izognejo dodatni odgovornosti za harmonsko popačenje.

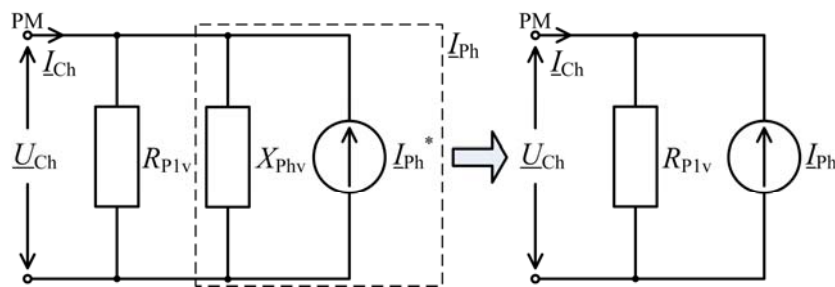
Na strani porabnika je v okviru doktorske naloge predlagano, da se referenčne impedance določijo na podlagi meritev na priključnem mestu porabnika v omrežje. Pri tem izhajamo iz obstoječe prakse o zahtevanem faktorju moči, kjer naj bi imel porabnik ohmski karakter ( $\cos\varphi = 1$ ) pri osnovni frekvenci. V nalogi je predlagano, da se taka praksa razširi na vse harmonske frekvence, kar pomeni, da je zaželen ohmski karakter porabnika ne samo pri osnovni frekvenci, ampak tudi pri vseh harmonskih frekvencah. V doktorski nalogi je za referenčno impedanco na strani porabnika tako predlagana ohmska komponenta bremena porabnika. Pri tem je mogoče upoštevati tudi frekvenčno odvisnost ohmske komponente zaradi kožnega pojava (angl. skin effect), ki pa jo v nadaljevanju zanemarimo. Določanje referenčne impedance porabnika je odvisno od tega, ali ugotavljamo odgovornost za tokovno



ali napetostno harmonsko popačenje. Pri tem je predpostavljeno, da na strani porabnika ni generacije delovne moči.

### 2.2.1.1 Odgovornost za tokovno harmonsko popačenje

Kot je bilo omenjeno, je referenčna impedanca porabnika določena z ohmsko komponento bremena porabnika. Ohmska referenčna vrednost pomeni ideal, pri katerem bi bil odjemalec samo ohmski porabnik, torej bi bil njegov faktor moči enak ena ( $\cos\varphi = 1$ ). Referenčna impedanca porabnika je izračunana iz meritev toka in napetosti osnovne komponente v točki priključitve porabnika v omrežje. V primeru določanja prispevkov k tokovnemu harmonskemu popačenju je impedanca porabnika predstavljena kot vzporedna vezava ohmske upornosti in reaktance (slika 2.8). Ker je referenčna impedanca porabnika enaka ohmski upornosti, se tok skozi reaktanco pretvori v ekvivalentni dodatni tokovni harmonski vir.



Slika 2.8: Pretvorba toka skozi reaktanco v dodaten tokovni harmonski vir

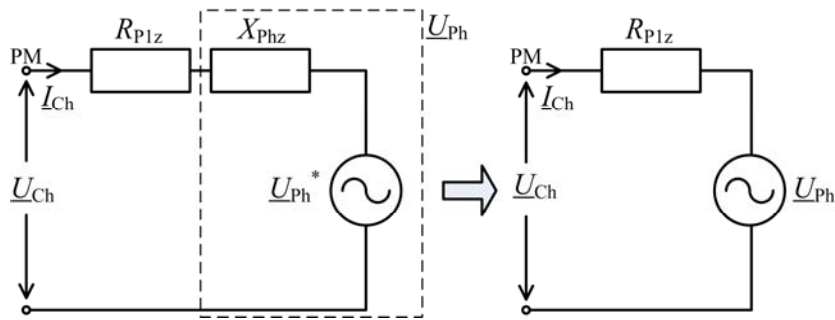
Ob predpostavki, da porabnik nima generacije delovne moči, izračunamo referenčno impedanco porabnika na podlagi izmerjene delovne moči pri osnovni frekvenci  $P_1$  in izmerjene napetosti na priključnem mestu.

$$\underline{Z}_{\text{Ph-ref}} = R_{\text{P1v}} = \frac{|\underline{U}_{\text{C1}}|^2}{P_1} = \frac{|\underline{U}_{\text{C1}}|}{|\underline{I}_{\text{C1}}| \cdot \cos\varphi_{\text{C1}}} \quad (52)$$

V enačbi (52) predstavlja  $\varphi_{\text{C1}}$  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 (36)–(43).

### 2.2.1.2 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 2.9).



Slika 2.9: Pretvorba padca napetosti na reaktanci v dodaten napetostni harmonski vir

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  $P_1$ .

$$\underline{Z}_{\text{Ph-ref}}^* = R_{P1z} = \frac{P_1}{|\underline{I}_{C1}|^2} = \frac{|\underline{U}_{C1}| \cdot \cos \varphi_{C1}}{|\underline{I}_{C1}|} \quad (53)$$

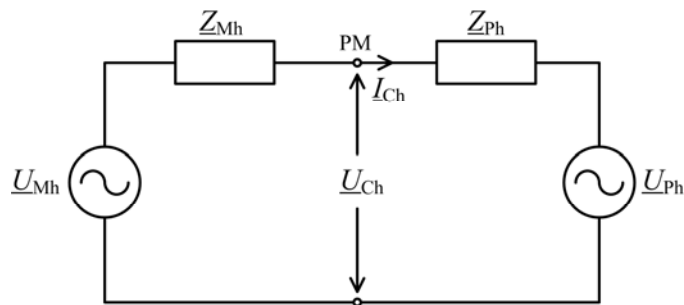
V enačbi (53) predstavlja  $\varphi_{C1}$  fazni kot med osnovno harmonsko komponento toka  $\underline{I}_{C1}$  in osnovno harmonsko komponento napetosti  $\underline{U}_{C1}$ . Ob znanih referenčnih impedancah je postopek izračuna prispevkov k harmonskemu popačenju napetosti opisan z enačbami (44)–(51).

## 2.3 Metoda po IEC 61000-3-6

Metodologija določanja prispevkov oziroma emisij harmonskega popačenja posameznega porabnika je obravnavana v [26], vendar metode običajno zahtevajo poznavanje dejanskih impedanc oziroma zahtevajo določene stikalne manipulacije, kjer se izključijo obravnavana bremena ali posamezni porabniki oziroma se emisije določajo na podlagi priključitev dodatnih

elementov oziroma dolgotrajnih meritev. Metodologija po IEC 61000-3-6 temelji na razliki harmonskega popačenja pred priključitvijo porabnika na omrežje in po njej. Emisije harmonskega popačenja na PM je mogoče določiti podobno kot pri metodi harmonskih vektorjev, pri čimer poznavanje dejanskih impedanc porabnika ni potrebno. Zaradi primerjave razmer pred priključitvijo bremena oziroma porabnika in po njej je mogoče neposredno določiti le emisije napetostnega harmonskega popačenja, medtem ko je treba za določitev emisij tokovnega harmonskega popačenja poznati dejanske impedance porabnika oziroma so potrebni dodatni posegi (stikalni manevri, dodatni elementi, dolgotrajne meritve) [26], ki pa so v praksi nezaželeni in pogosto neizvedljivi.

Pri določanju emisij napetostnega harmonskega popačenja, kot je opredeljeno v IEC 61000-3-6 [13], [15] in je prikazano na sliki 1.13, lahko uporabimo Theveninovo ekvivalentno vezje (slika 2.10).



Slika 2.10: Theveninov ekvivalentni tokokrog pri metodi po IEC 61000-3-6

Theveninov tokokrog predstavlja omrežno in porabniško stran z napetostnima harmonskima viroma ( $\underline{U}_{Mh}$  oz.  $\underline{U}_{Ph}$ ) in dejanskima harmonskima impedancama ( $\underline{Z}_{Mh}$  oz.  $\underline{Z}_{Ph}$ ). Tok  $\underline{I}_{Ch}$  in napetost  $\underline{U}_{Ch}$  sta izmerjena na PM. Indeks  $h$  predstavlja red harmonske komponente. Če predpostavimo, da so harmonske impedance znane, lahko iz izmerjenih vrednosti na PM izračunamo napetostni harmonski vir na strani omrežja (54).

$$\underline{U}_{Mh} = \underline{U}_{Ch} + \underline{I}_{Ch} \cdot \underline{Z}_{Mh} \quad (54)$$

Napetostni harmonski vir  $\underline{U}_{Mh}$  predstavlja napetostno harmonsko popačenje reda  $h$  pred priključitvijo bremena oziroma porabnika. Izmerjena harmonska napetost  $\underline{U}_{Ch}$  predstavlja razmere po priključitvi porabnika. Iz navedenega lahko zapišemo:

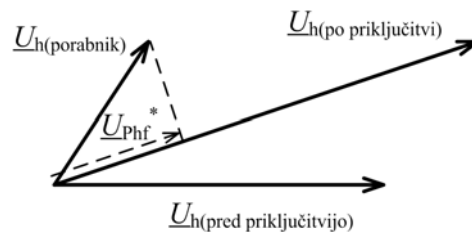
$$\underline{U}_{Mh} = \underline{U}_{h(\text{pred priključitvijo})} \quad (55)$$

$$\underline{U}_{Ch} = \underline{U}_{h(\text{po priključitvi})} \cdot \quad (56)$$

Glede na sliko 1.13 je vektor napetostnega harmonika, ki ga povzroča porabnik, enak razliki vektorjev napetostnega harmonskega popačenja reda  $h$  pred priključitvijo porabnika in po njej (57).

$$\underline{U}_{h(\text{porabnik})} = \underline{U}_{h(\text{po priključitvi})} - \underline{U}_{h(\text{pred priključitvijo})} \quad (57)$$

Emisija harmonskega popačenja je v IEC 61000-3-6 [15] določena z amplitudo vektorja napetostnega harmonika, ki ga povzroča porabnik ( $\underline{U}_{h(\text{porabnik})}$ ). Tako ni potrebno poznavanje faznega kota med harmonskim tokom in napetostjo, saj iz enačb (54)–(57) sledi, da je amplituda napetostnega vektorja zaradi porabnika določena s produktom amplitude izmerjenega toka ( $\underline{I}_{Ch}$ ) in omrežne impedance ( $\underline{Z}_{Mh}$ ). Potreben podatek o faznem kotu med harmonskim tokom in napetostjo lahko povzroča težave zaradi natančnosti meritve faznega kota [36], ki je problematična predvsem pri višjih frekvencah. Kljub vsemu amplituda vektorja napetostnega harmonika pogosto ne podaja pravilne slike o vplivu porabnika na harmonsko popačenje. Porabnik lahko na PM kompenzira ali ojači harmonsko popačenje, zato bi bilo primerneje določiti dejansko odgovornost na podlagi projekcije napetostnega vektorja porabnika  $\underline{U}_{h(\text{porabnik})}$  na izmerjeno vrednost  $\underline{U}_{Ch}$ . Predlagani postopek je predstavljen na sliki 2.11.



Slika 2.11: Odgovornost porabnika za harmonsko popačenje po IEC 61000-3-6, če poleg amplitude upoštevamo tudi fazni kot

Odgovornost porabnika se izračuna po enačbi (58):

$$U_{Phf}^* = \left| \underline{U}_{h(\text{porabnik})} \right| \cdot \cos \left( \delta_{h(\text{porabnik})} - \delta_{h(\text{po priključitvi})} \right), \quad (58)$$

kjer  $U_{Phf}^*$  predstavlja odgovornost porabnika za harmonsko popačenje, določeno po IEC 61000-3-6.  $\delta_{h(\text{porabnik})}$  je fazni kot vektorja napetostnega harmonika, ki ga povzroča porabnik ( $\underline{U}_{h(\text{porabnik})}$ ), in  $\delta_{h(\text{po priključitvi})}$  fazni kot izmerjene vrednosti napetostnega harmonika na PM

( $\underline{U}_{h(po\ priključitvi)}$ ) po priključitvi porabnika v omrežje. Opisani postopek nam omogoča neposredno primerjavo metod in rezultatov, vendar zahteva podatek o faznem kotu napetostnega harmonika.

Metoda po IEC 61000-3-6 ne zahteva poznavanja impedanc na strani porabnika, kar je vsekakor prednost za praktično uporabo, vendar za določitev emisij harmonskega popačenja zahteva poznavanje dejanskih omrežnih impedanc. Vsekakor pa je tudi v tem primeru mogoča uporaba referenčnih impedanc na strani omrežja.



### 3 PREIZKUS METODE HARMONSKIH VEKTORJEV Z REFERENČNIMI IMPEDANCAMI NA PREPROSTEM MODELU OMREŽJA

Metoda harmonskih vektorjev z upoštevanjem referenčnih impedanc, ki je bila predstavljena v razdelku 2.2, je v nadaljevanju preizkušena na podlagi modela omrežja, kot je prikazan na sliki 2.1 oziroma 2.2. Model omrežja je opisan z matematičnimi enačbami v programskem okolju MATLAB, kjer so obravnavani različni primeri in raziskani vplivi spreminjanja posameznih parametrov na rezultate metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami. Obravnavani so naslednji primeri:

∂ **Harmonski vir samo na strani omrežja:**

- vpliv spremembe impedance omrežja in harmonskega vira;
- vpliv spremembe bremena porabnika (s kompenzatorjem jalove energije ali brez njega).

∂ **Harmonski vir samo na strani porabnika:**

- vpliv spremembe linearnega bremena porabnika in harmonskega vira;
- vpliv spremembe impedance omrežja.

∂ **Harmonski vir na strani porabnika in omrežja:**

- vpliv spremembe harmonskega vira na strani porabnika.

Efektivna vrednost napetosti osnovne harmonske komponente na strani omrežja je v modelu omrežja enaka 230 V (fazna), frekvence 50 Hz. V vseh primerih je predpostavljeno, da na strani porabnika ni vira delovne energije oziroma ni generacije električne energije. V modelu omrežja je v obravnavanih primerih predpostavljena 5. harmonska komponenta toka oziroma napetosti, ki je pogosta v realnih omrežjih. Ko je v modelu omrežja obravnavan tudi kompenzator jalove energije (kondenzator), je poleg 5. harmonske komponente obravnavana še 13. harmonska komponenta napetosti in toka.

### 3.1 Harmonski vir samo na strani omrežja

V modelu omrežja je harmonski vir samo na strani omrežja, pri čimer sta obravnavana vpliv spremembe impedance omrežja in harmonskega vira ter vpliv spremembe porabniškega bremena. Harmonski vir na strani omrežja je napetostni vir 5. harmonske komponente (250 Hz), z efektivno vrednostjo  $U_{M5} = 2,31$  V, ki je enaka enemu odstotku efektivne vrednosti osnovne harmonske komponente fazne napetosti. Pri analizi vpliva spremembe bremena porabnika na odgovornost za harmonsko popačenje je obravnavana tudi 13. harmonska komponenta. Efektivna vrednost 13. harmonske komponente napetosti na strani omrežja je enaka kot v primeru 5. harmonske komponente ( $U_{M13} = 2,31$  V). Impedance na strani omrežja in porabnika se spreminjajo glede na obravnavani primer. Rezultati metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami oziroma izračunana odgovornost (prispevki) porabnika in omrežja za harmonsko popačenje na PM je podana v odstotkih in predstavlja odstotni delež izmerjene napetosti oziroma toka na PM (slika 2.4).

#### 3.1.1 Vpliv spremembe impedance omrežja in harmonskega vira

Če se spreminjajo impedance na strani porabnika ali na strani omrežja, se spreminja tudi harmonsko popačenje. Porabnik ne more biti odgovoren za povečanje ali zmanjšanje harmonskega popačenja, če je to posledica spremembe impedance na strani omrežja. Prav tako omrežje ni odgovorno za spremembo harmonskega popačenja, ki je posledica neustreznega delovanja porabnika.

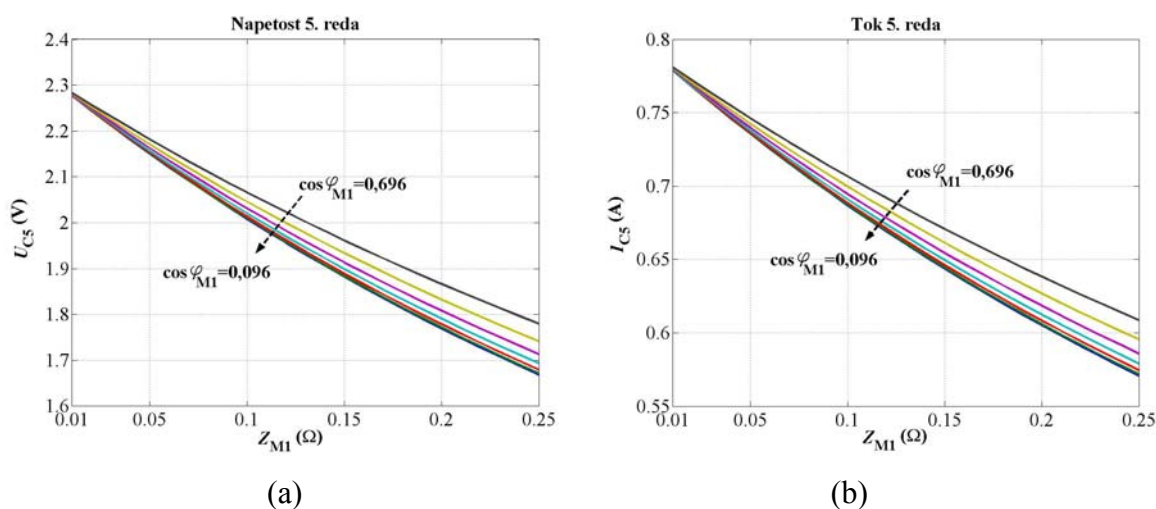
V danem primeru na strani porabnika ni vira harmonskega popačenja, priključeno je le linearno  $R$ - $L$  breme moči  $S_{RL} = 100$  kVA,  $\cos \varphi_{RL} = 0,95$ . Referenčne impedance porabnika so izračunane iz napetosti in toka osnovne harmonske komponente na PM, in sicer po enačbi (52) oziroma (53).

Na strani omrežja sta absolutna vrednost referenčne impedance osnovne frekvence in pripadajoči faktor moči enaka  $|\underline{Z}_{M1-ref}| = 0,024 \Omega$  in  $\cos \varphi_{M1-ref} = 0,196$ , pri čimer je vrednost impedance 5. harmonske komponente izračunana kot

$$\underline{Z}_{Mh-ref} = |\underline{Z}_{M1-ref}| \cdot \cos \varphi_{M1-ref} + j \cdot h \cdot |\underline{Z}_{M1-ref}| \cdot \sin \varphi_{M1-ref}, \quad (59)$$

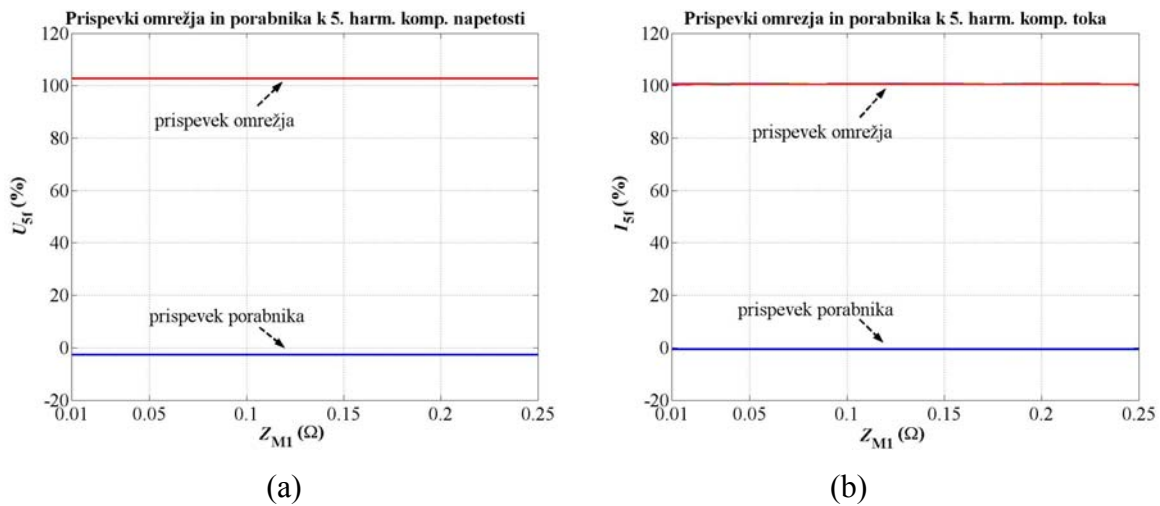


kjer je  $h$  red harmonske komponente ( $h = 5$ ). Vpliv spremembe omrežne impedance na odgovornost za harmonsko popačenje obravnavamo tako, da spreminjamo omrežno impedanco po absolutni vrednosti  $|Z_{M1}| = 0,01\text{--}0,25 \Omega$  in faktorju moči  $\cos\varphi_{M1} = 0,096\text{--}0,696$ . Vrednosti 5. harmonske komponente napetosti in toka na PM v odvisnosti od impedance omrežja so podane na sliki 3.1 a in sliki 3.1 b. Kot med napetostjo in tokom 5. harmonske komponente na PM znaša  $58,68^\circ$  in je neodvisen od spremembe impedance omrežja.



Slika 3.1: 5. harmonska komponenta napetosti (a) in toka (b) na PM

Referenčna impedanca na strani porabnika znaša v primeru računanja tokovnih prispevkov  $Z_{P5\text{-ref}} = 1,684 \Omega$  ter pri računanju prispevkov k napetostnemu popačenju 5. reda  $Z_{P5\text{-ref}}^* = 1,52 \Omega$ . Referenčna impedanca porabnika je v danem primeru neodvisna od spremembe impedance omrežja. Na sliki 3.2 je prikazana odgovornost oziroma prispevki omrežja in porabnika k harmonskemu popačenju 5. reda na PM. Rezultati so navedeni v odstotkih in predstavljajo odstotni delež vrednosti napetosti in toka na PM (slika 2.4).



Slika 3.2: Prispevki oziroma odgovornost za 5. harmonsko komponento napetosti (a) in toka (b) na PM pri spremembi impedance na strani omrežja

Kot je prikazano na sliki 3.2, se odgovornost za harmonsko popačenje, izračunana z metodo harmonskih vektorjev in uporabo referenčnih impedanc, ne spreminja s spremembo impedance na strani omrežja. Porabnik, ki nima vira harmonskega popačenja, v danem primeru ni odgovoren za harmonsko popačenje. Njegov prispevek k napetostnemu in tokovnemu popačenju 5. reda je rahlo negativen, kar nakazuje na zmanjševanje 5. harmonika na PM. Iz rezultatov, prikazanih na sliki 3.2, sledi, da sprememba impedance omrežja ne vpliva na odgovornost porabnika za harmonsko popačenje na PM, če ta nima vira harmonskega popačenja. To je skladno s stališčem, da porabnik ne more biti odgovoren za povečano ali zmanjšano harmonsko popačenje, ki je posledica sprememb na strani omrežja.

Podobno metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami pokaže nespremenjeno odgovornost porabnika tudi v primeru spremembe harmonskega vira na strani omrežja. Harmonski vir spreminjamo po velikosti ( $U_{M5} = 2,31\text{--}11,31\text{ V}$ ) in faznemu kotu ( $\varphi_{UM5} = 0\text{--}180^\circ$ ), medtem ko se impedance na strani porabnika in omrežja ne spreminjajo in imajo že navedene referenčne vrednosti. Rezultati so enaki kot v primeru, prikazanem na sliki 3.2, zato niso posebej navedeni. Odgovornost porabnika in omrežja za harmonsko popačenje napetosti in toka ostaja nespremenjena ne glede na amplitudo in fazni kot harmonskega vira na strani omrežja.

Rezultati prispevkov oziroma odgovornosti porabnika in omrežja k osnovni in 5. harmonski komponenti toka in napetosti na PM so navedeni v tabeli 3.1. Rezultati odgovornosti za

harmonsko popačenje so enaki ne glede na to, ali se spreminja omrežna impedanca ali harmonski vir na strani omrežja.

Tabela 3.1: Prispevki omrežja in porabnika k osnovni in 5. harmonski komponenti napetosti in toka na PM

Harmonski red	Prispevki omrežja in porabnika			
	$I_{Mhf}$ (%)	$I_{Phf}$ (%)	$U_{Mhf}$ (%)	$U_{Phf}$ (%)
1	90,69	9,31	100,42	-0,42
5	100,58	-0,58	102,74	-2,74

Porabnik izkazuje majhen negativni prispevek k napetosti in toku 5. reda, kar pomeni, da s svojo impedanco kompenzira oziroma zmanjšuje napetostno in tokovno popačenje na PM.

Čeprav na strani porabnika ni vira energije, je prispevek porabnika k osnovni harmonski komponenti napetosti negativen. Negativni prispevek nakazuje, da porabnik zaradi induktivnega karakterja impedance nekoliko zmanjšuje osnovno komponento napetosti na PM. Prispevek porabnika k osnovni komponenti toka je posledica odstopanja dejanske impedance od referenčne vrednosti oziroma odstopanje od zahtevanega faktorja moči  $\cos\varphi_{RL} = 1$  (ohmski karakter porabnika).

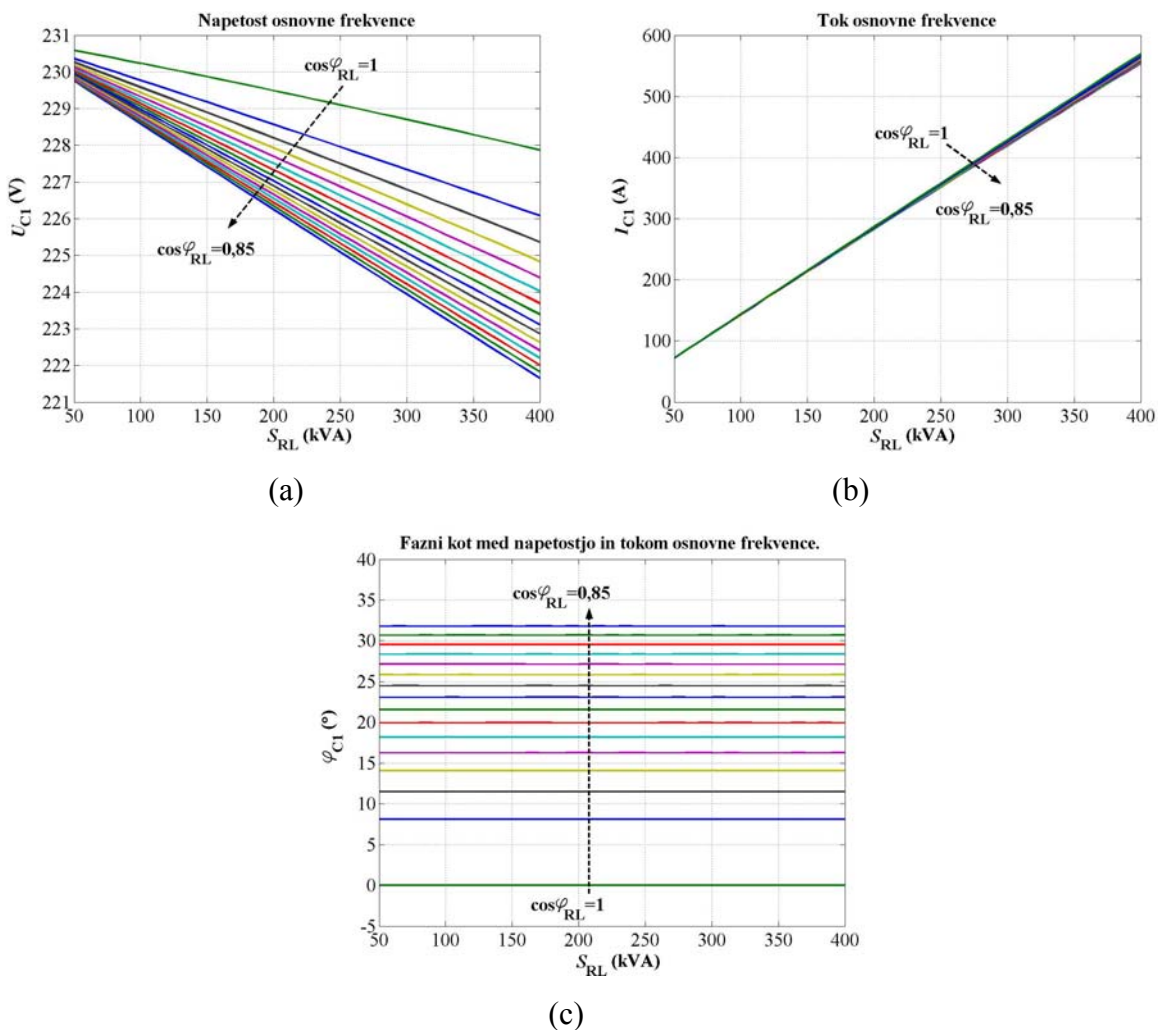
### 3.1.2 Vpliv spremembe bremena porabnika

Breme porabnika se v praksi neprestano spreminja, poleg tega ima lahko porabnik na svoji strani priključeno tudi kompenzacijo jalove energije (kondenzator), ki lahko precej vpliva na harmonsko popačenje. Ob nastopu resonančnih stanj okoli harmonskih frekvenc, ki so prisotne v omrežju, se te ojačijo. V nadaljevanju sta obravnavana primera, ko na strani porabnika ni kondenzatorja, in primer porabnika s priključenim kompenzatorjem jalove energije oziroma kondenzatorjem. V obeh primerih je referenčna impedanca omrežja enaka dejanski omrežni impedanci. Absolutna vrednost referenčne impedance omrežja pri osnovni frekvenci (50 Hz) in faktor moči sta enaka  $|\underline{Z}_{M1-ref}| = 0,024 \Omega$  in  $\cos\varphi_{M1-ref} = 0,196$ . Obravnavana je 5. harmonska komponenta. V primeru kondenzatorja na strani porabnika je obravnavana tudi 13. harmonska komponenta. Referenčni impedanci omrežja za 5. in 13. harmonski red sta izračunani po enačbi (59).

### 3.1.2.1 Sprememba $R$ - $L$ bremena porabnika

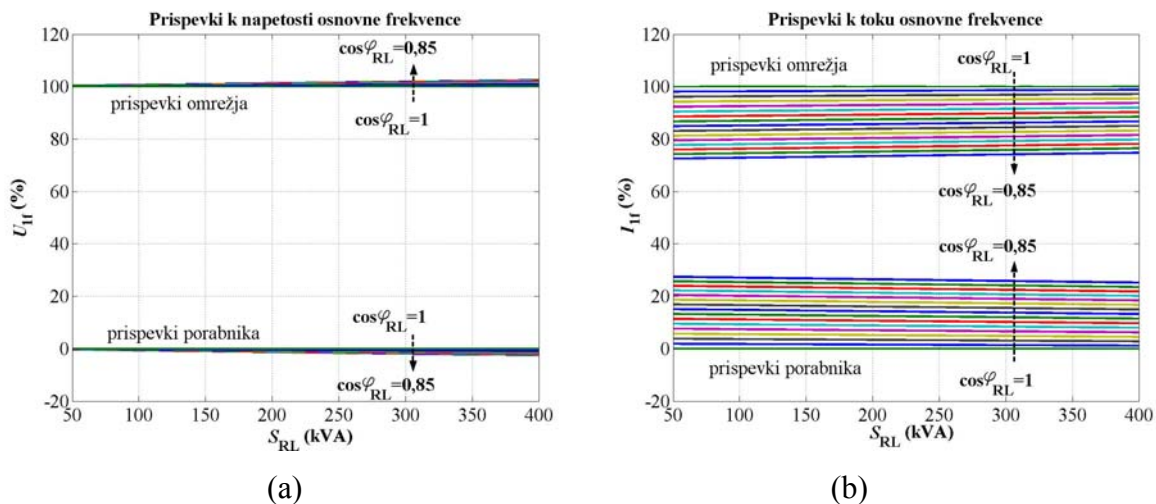
Na strani porabnika ni vira harmonskega popačenja, priključeno pa je linearno  $R$ - $L$  breme, ki se spreminja tako po moči (spreminja se navidezna moč bremena  $S_{RL}$  v kVA) kot po faktorju moči  $\cos\varphi_{RL}$ . Navidezna moč  $R$ - $L$  bremena se spreminja od  $S_{RL} = 50$ – $400$  kVA, medtem ko se faktor moči bremena spreminja od  $\cos\varphi_{RL} = 0,85$ – $1$ , s korakom  $0,01$ . Efektivna vrednost napetosti vira 5. harmonske napetosti na strani omrežja je enaka  $U_{M5} = 2,31$  V ( $\varphi_{UM5} = 0^\circ$ ). Referenčne impedance porabnika so izračunane na podlagi vrednosti napetosti in toka osnovne frekvence na priključnem mestu porabnika v omrežje (enačbi (52), (53)).

Vrednosti osnovne harmonske komponente napetosti in toka ter faznega kota med njima na PM so prikazane na sliki 3.3.



Slika 3.3: Napetost (a), tok (b) in fazni kot (c) osnovne harmonske komponente na PM

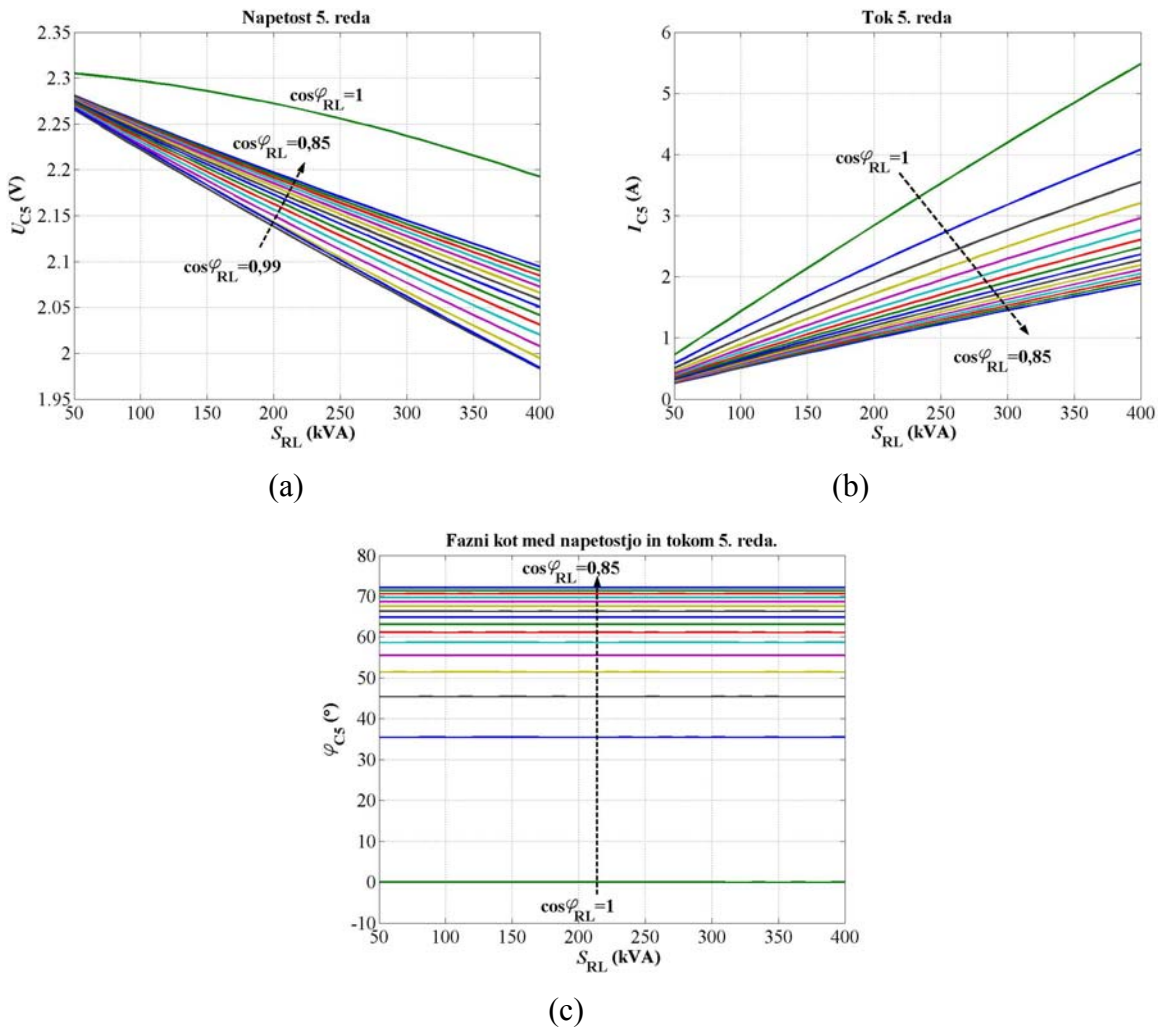
Na sliki 3.3 je prikazan vpliv spremembe bremena porabnika na osnovno komponento toka in napetosti na PM. Napetost doseže najnižjo vrednost pri največji navidezni moči in najslabšem faktorju moči bremena. Prispevki omrežja in porabnika k osnovni komponenti napetosti in toka so predstavljeni na slikah 3.4 a in 3.4 b. Prispevki so navedeni v odstotkih in predstavljajo odstotni delež vrednosti napetosti in toka na PM.



Slika 3.4: Prispevki omrežja in porabnika k napetosti in toku osnovne frekvence na PM

Prispevki porabnika k osnovni harmonski komponenti napetosti so nični oziroma rahlo negativni in skladni z zmanjševanjem napetosti osnovne harmonske komponente, kot je prikazano na sliki 3.3 a. Prispevki porabnika k osnovni komponenti toka so posledica odstopanja dejanske impedance porabnika od referenčne vrednosti oziroma odstopanje od idealnega faktorja moči  $\cos\varphi_{RL} = 1$  (ohmski karakter porabnika). Tokovni prispevek porabnika se s slabšanjem faktorja moči bremena povečuje.

Vrednosti 5. harmonske komponente napetosti so navedene na sliki 3.5 a, toka na sliki 3.5 b in faznega kota med njima na sliki 3.5 c.

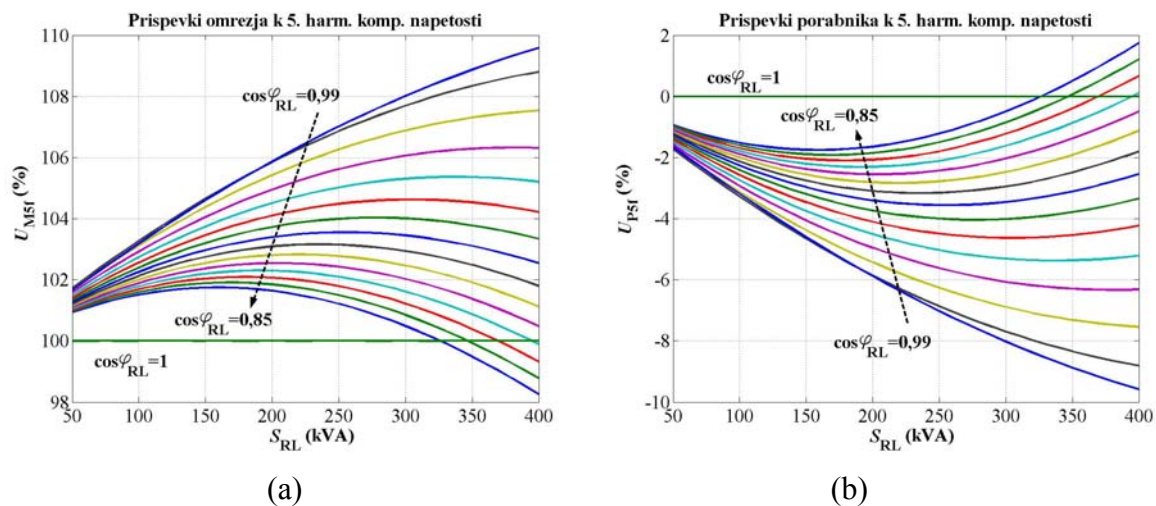


Slika 3.5: Vrednosti 5. harmonske komponente napetosti, toka in faznega kota na PM

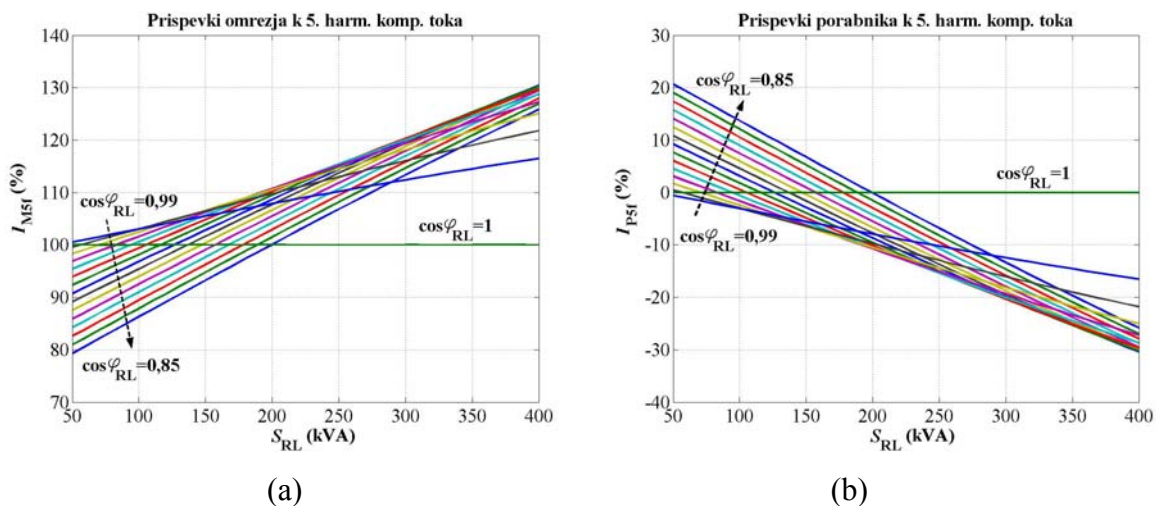
Tok 5. harmonske komponente se povečuje skladno z močjo bremena, pri čimer doseže najvišjo vrednost pri čisto ohmskem karakterju bremena ( $\cos\varphi_{RL} = 1$ ). S povečevanjem navidezne moči bremena se 5. harmonska komponenta napetosti na PM zmanjšuje. Največje vrednosti 5. napetostnega harmonika na PM so izmerjene v primeru  $\cos\varphi_{RL} = 1$ , ko je tudi absolutna vrednost tokovnega harmonika 5. reda največja, padec napetosti na omrežni impedanci  $\underline{Z}_{Mh}$  pa je, zaradi majhne ohmske komponente, majhen.

Na slikah 3.6 in 3.7 so prikazani rezultati metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami v primeru spreminjanja  $R$ - $L$  bremena. Odgovornost oziroma prispevki so podani v odstotkih in predstavljajo odstotni delež vrednosti napetosti in toka na PM.





Slika 3.6: Prispevki omrežja (a) in porabnika (b) k 5. harmonski komponenti napetosti na PM v odvisnosti od R-L bremena porabnika



Slika 3.7: Prispevki omrežja (a) in porabnika (b) k 5. harmonski komponenti toka na PM v odvisnosti od R-L bremena porabnika

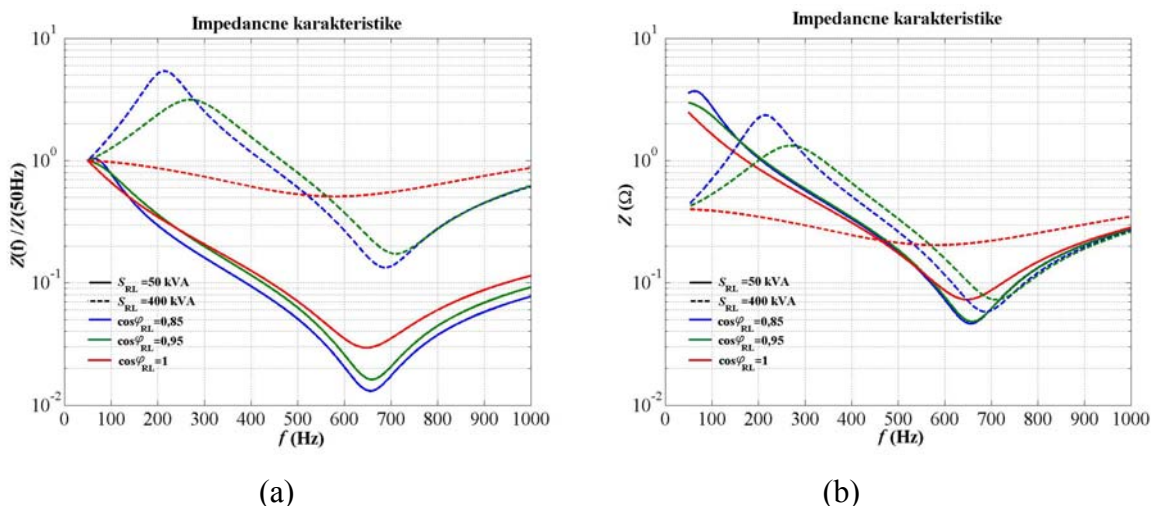
Iz rezultatov na sliki 3.6b je razvidno, da je prispevek porabnika k 5. harmonski komponenti napetosti negativen za vse obravnavane vrednosti bremena, s faktorjem moči nekje do  $\cos \varphi_{RL} = 0,9$ . S slabšanjem faktorja moči bremena porabnika metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami pokaže odgovornost porabnika za harmonsko popačenje napetosti, čeprav na strani porabnika ni vira harmonskega popačenja. Pozitivni prispevek porabnika k harmonskemu popačenju na PM je posledica neustreznega faktorja moči R-L bremena, ki odstopa od želene vrednosti  $\cos \varphi_{RL} = 1$ . V praksi naj bi porabniki obratovali s faktorjem moči večjim od  $\cos \varphi_{RL} = 0,95$  (pri frekvenci 50 Hz), sicer je porabnik ustrezno sankcioniran. Pri

porabniškem bremenu s  $\cos\varphi_{RL} > 0,95$  metoda praktično ne pokaže odgovornosti porabnika za harmonsko popačenje, če ta nima vira harmonskega popačenja. Majhen pozitiven prispevek porabnika se sicer pokaže pri nižjih vrednostih tokovnega popačenja 5. reda, kar je posledica odstopanja od idealnega faktorja moči  $\cos\varphi_{RL} = 1$ . Ker je prispevek reda nekaj odstotkov, ga lahko zanemarimo oziroma določimo kot tolerančno območje, poleg tega pa se pojavi v območju nizkih vrednosti 5. harmonske komponente toka, kjer tudi določanje odgovornosti izgubi veljavo oziroma pomen. Kljub temu metoda omogoča razmeroma natančno oceno odgovornosti omrežja in porabnika za harmonsko popačenje v primeru harmonskega vira samo na strani omrežja in sprememb  $R$ - $L$  bremena na strani porabnika.

### 3.1.2.2 Sprememba $R$ - $L$ bremena porabnika pri vključenem kondenzatorju

Ko je na strani porabnika prisoten tudi kondenzator oziroma kompenzator jalove energije, sta obravnavani 5. in 13. harmonska komponenta toka in napetosti. Efektivna vrednost napetosti vira 5. in 13. harmonske komponente napetosti je enaka  $U_{M5} = U_{M13} = 2,31$  V. Na strani porabnika ni vira harmonskega popačenja, priključeno pa je linearno  $R$ - $L$  breme, ki mu je vzporedno priključen tudi kompenzator jalove energije ( $Q_C = 40$  kVAr). Breme porabnika ( $R$ - $L$ ) se spreminja po moči ( $S_{RL}$ ) in faktorju moči  $\cos\varphi_{RL}$ . Navidezna moč  $R$ - $L$  bremena se spreminja od  $S_{RL}=50$ – $400$  kVA, medtem ko se faktor moči  $R$ - $L$  bremena spreminja od  $\cos\varphi_{RL} = 0,85$ – $1$ , s korakom  $0,01$ . Referenčne impedance porabnika so izračunane na podlagi vrednosti napetosti in toka osnovne frekvence na priključnem mestu (enačbi (52), (53)). Ker se s priključitvijo kondenzatorja spremenijo impedančne frekvenčne karakteristike, je treba posebno pozornost nameniti resonančnim stanjem. Impedančne karakteristike opazovane s strani omrežja so predstavljene na sliki 3.8, prikazujejo pa relativne (slika 3.8 a) in absolutne vrednosti (slika 3.8 b) impedance glede na faktor moči in navidezno moč bremena porabnika.

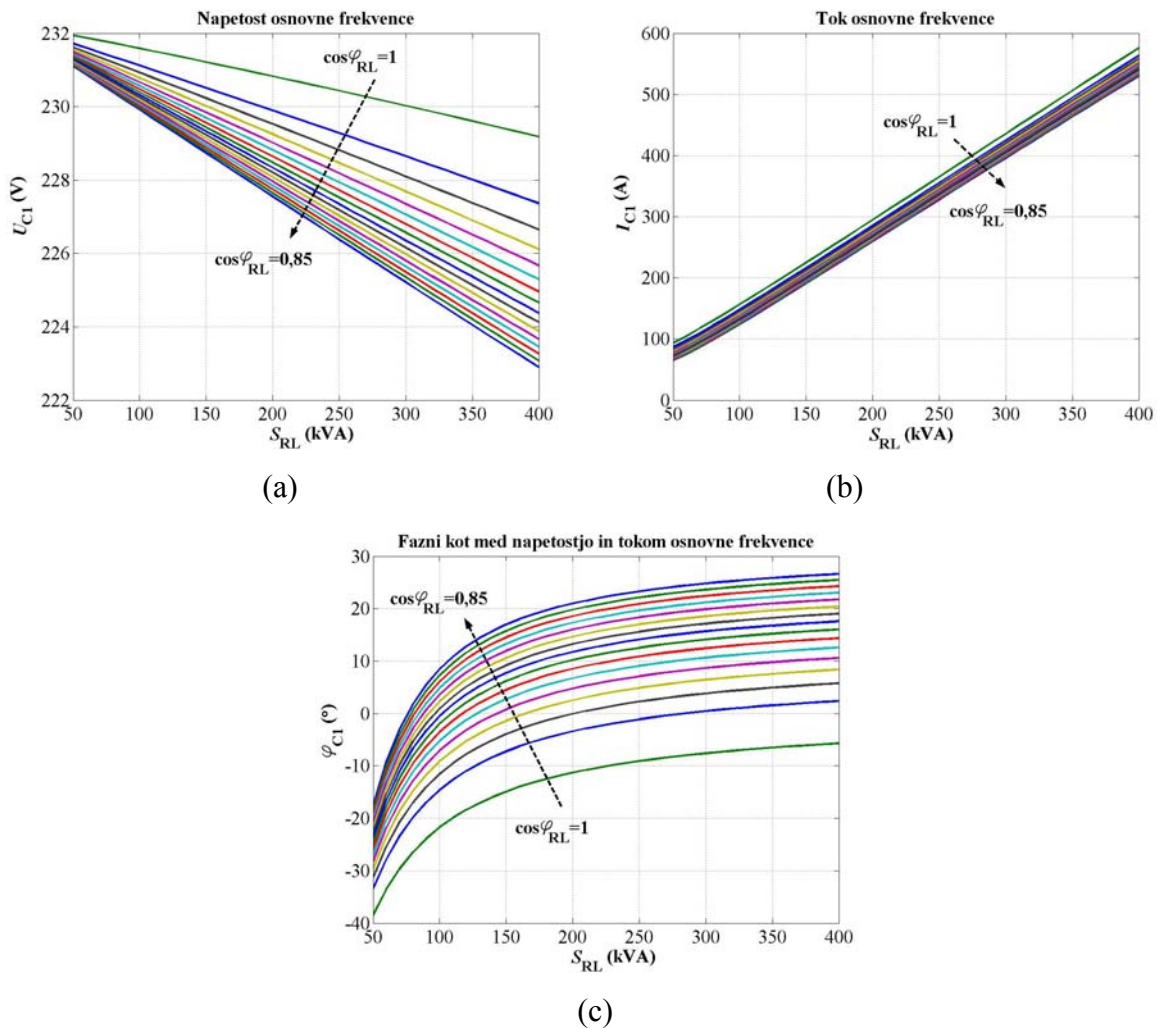




Slika 3.8: Impedančne frekvenčne karakteristike opazovane s strani omrežja v primeru harmonskega vira na strani omrežja in spremembe bremena porabnika

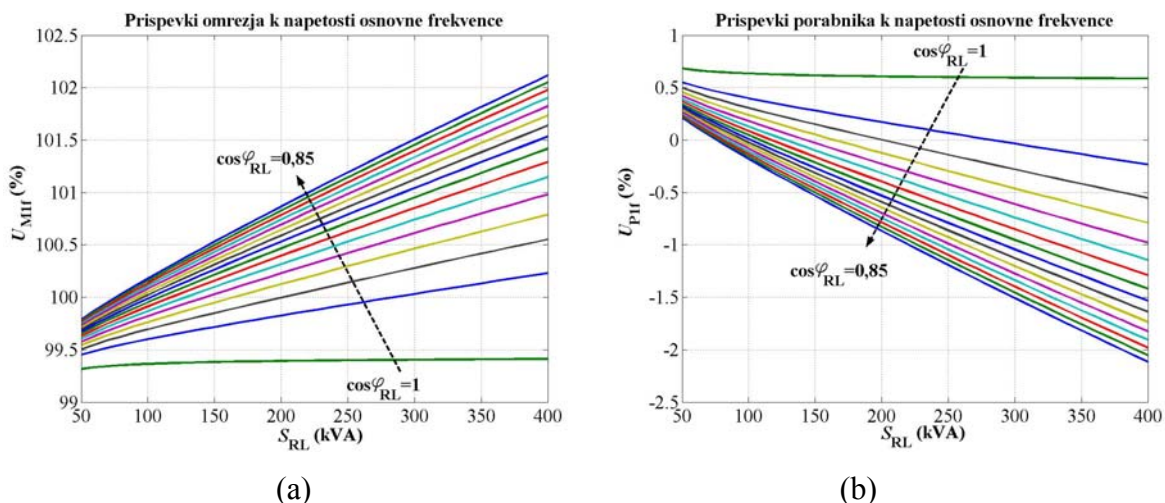
Relativna in absolutna vrednost impedance dosežeta najnižjo vrednost okoli frekvence 650 Hz (13. harmonska komponenta). To je resonančna točka obravnavanega sistema in se s spreminjanjem bremena porabnika bistveno ne premika po frekvenčni osi oziroma se rahlo pomika proti višjim frekvencam. S spremembo bremena se spremeni predvsem izrazitost resonančnega pojava, saj je vrednost impedance v resonančni točki pri manjših močeh porabniškega bremena (50 kVA) manjša kot pri večjih močeh (400 kVA). Majhna absolutna vrednost impedance v resonančni točki pomeni, da že majhen napetostni harmonski vir na strani omrežja lahko povzroči velike harmonske tokove. Resonančni pojav je glede na impedančne karakteristike, prikazane na sliki 3.8, najizrazitejši pri majhnem bremenu glede na velikost kondenzatorja.

Vrednosti osnovne harmonske komponente napetosti in toka ter faznega kota med njima na PM so prikazane na slikah 3.9 a, 3.9 b in 3.9 c.

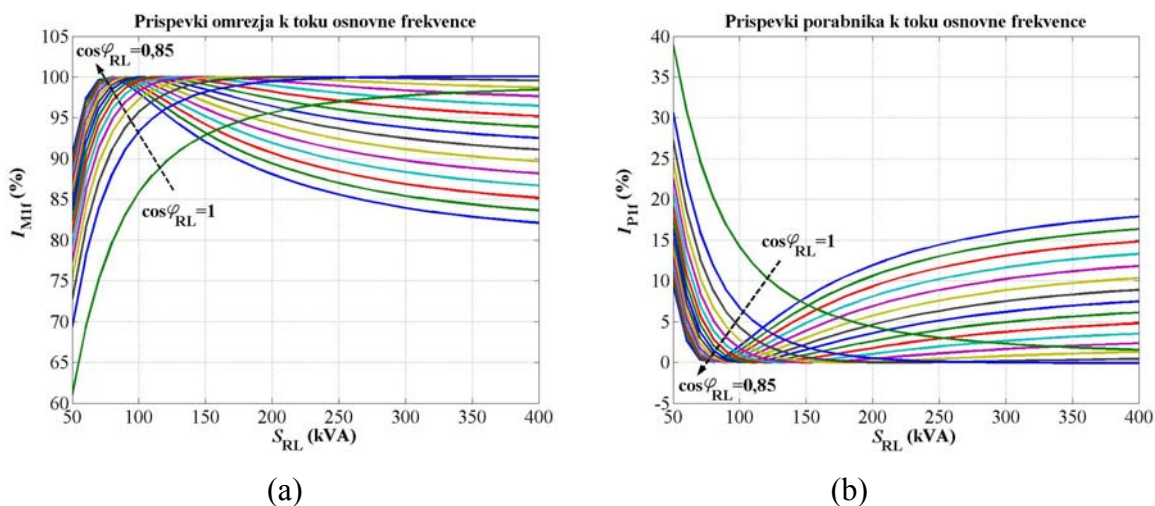


Slika 3.9: Napetost, tok in fazni kot osnovne harmonske komponente na PM

Na sliki 3.9 c je prikazano, da je kot med napetostjo in tokom osnovne frekvence pri majhnih bremenih negativen, torej je porabnik prekompenziran (kapacitivni karakter porabnika). Zaradi tega je napetost osnovne frekvence nekoliko višja kot v primeru porabnika brez kompenzacije jalove energije (slika 3.3 a). Prispevki omrežja in porabnika k osnovni harmonski komponenti napetosti in toka na PM so prikazani na slikah 3.10 in 3.11.

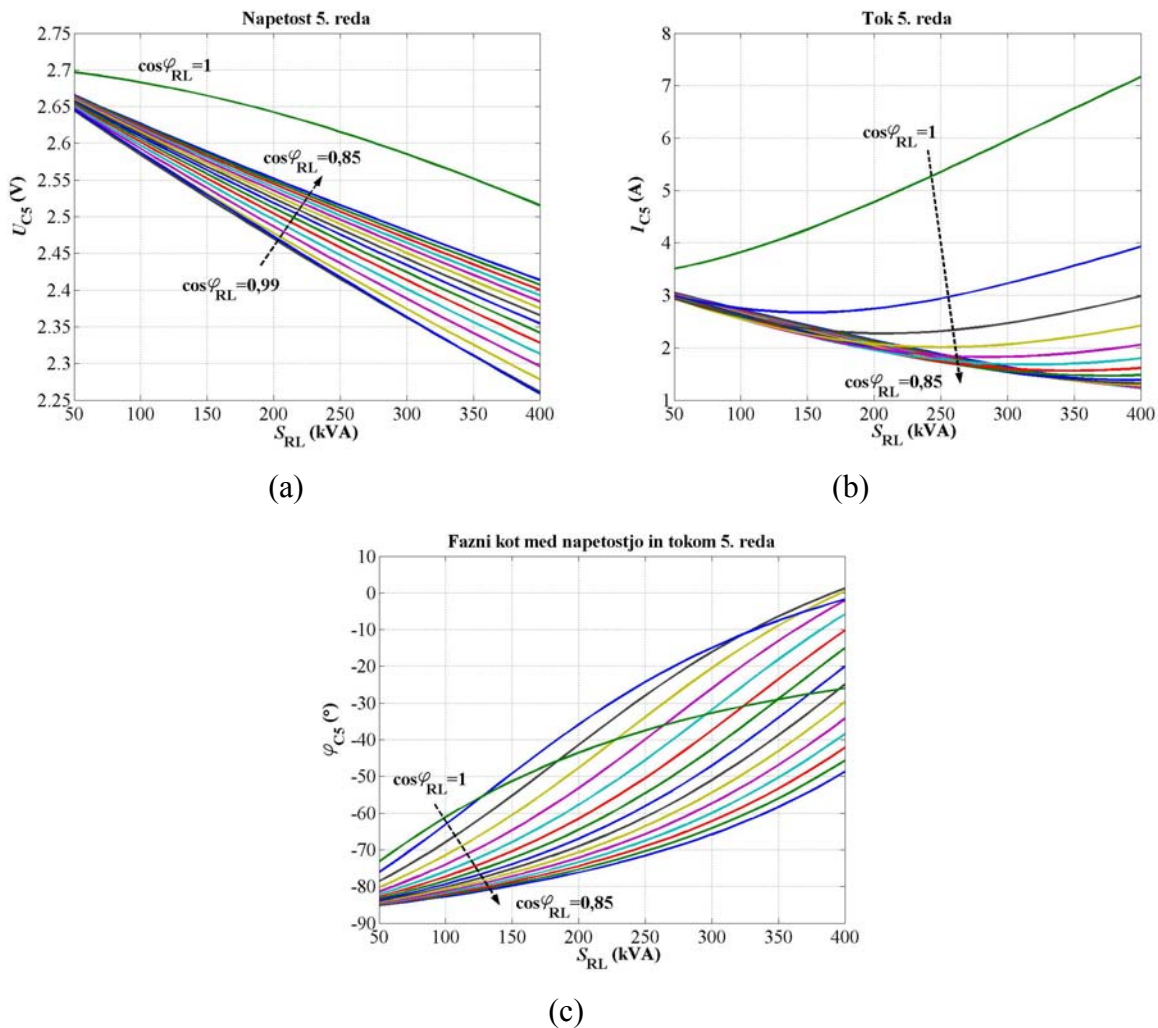


Slika 3.10: Prispevki omrežja (a) in porabnika (b) k napetosti osnovne frekvence na PM



Slika 3.11: Prispevki omrežja (a) in porabnika (b) k toku osnovne frekvence na PM

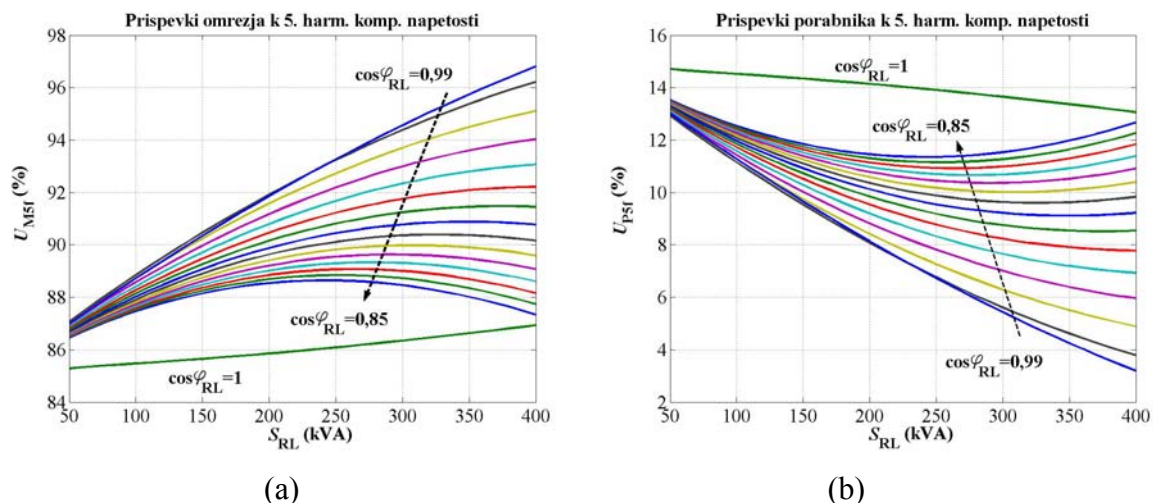
Porabnik, ki ima kapacitivni karakter oziroma je prekompenziran ter s tem zvišuje napetost osnovne frekvence na PM, izkazuje pozitiven prispevek k napetosti osnovne frekvence. Porabniško breme induktivnega značaja znižuje napetost osnovne frekvence na PM, zato je njegov prispevek negativen. Pri osnovni komponenti toka je prispevek porabnika sorazmeren odstopanju faktorja moči bremena od referenčne oziroma želene vrednosti  $\cos\varphi_{RL} = 1$ . V nadaljevanju je podana 5. harmonska komponenta, izmerjena na PM, in sicer je na sliki 3.12 a podana napetost, na sliki 3.12 b tok in na sliki 3.12 c fazni kot med tokom in napetostjo 5. reda.



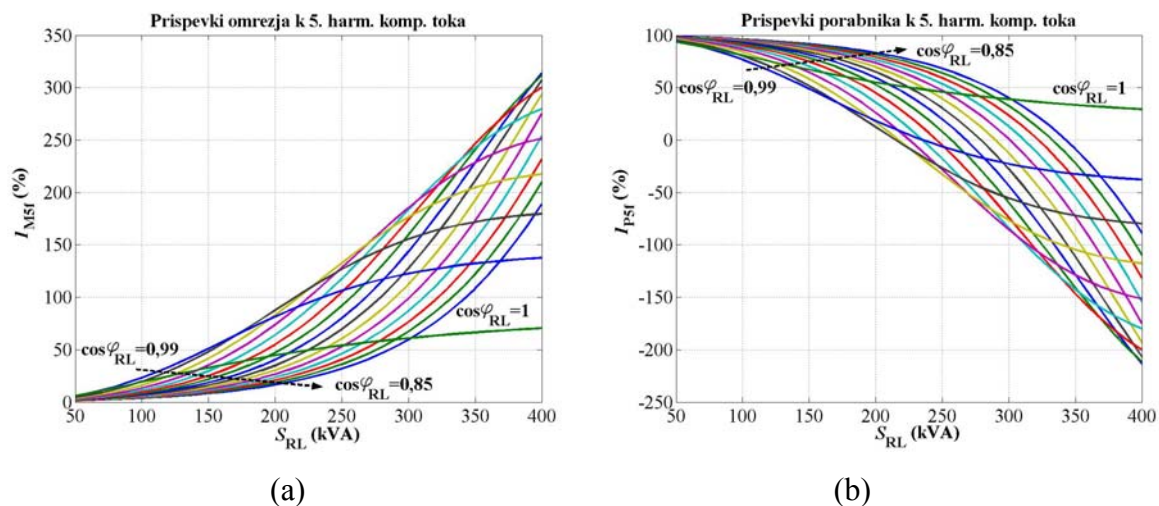
Slika 3.12: Napetost, tok in fazni kot 5. harmonske komponente na PM

Primerjava napetostnih razmer v primeru porabnika s kondenzatorjem (slika 3.12 a) in brez njega (slika 3.5 a) kaže, da se 5. harmonska komponenta napetosti na PM ojači, ko je na strani porabnika prisoten kondenzator. To je posledica neustrezne impedance porabnika in sprememb impedančnih frekvenčnih karakteristik za katere je odgovoren porabnik. Pri 5. harmonski komponenti toka je, v odvisnosti od navidezne moči in faktorja moči  $R-L$  bremena, mogoče opaziti tako ojačenje kot zmanjšanje toka 5. reda na PM. Tokovne razmere so odvisne od impedančnih karakteristik, ki so prikazane na sliki 3.8 b. Izračunani prispevki omrežja in porabnika k osnovni harmonski komponenti napetosti in toka na PM so prikazani na slikah 3.13 in 3.14.





Slika 3.13: Prispevek omrežja (a) in porabnika (b) k 5. harmonski komponenti napetosti na PM v odvisnosti od bremena porabnika



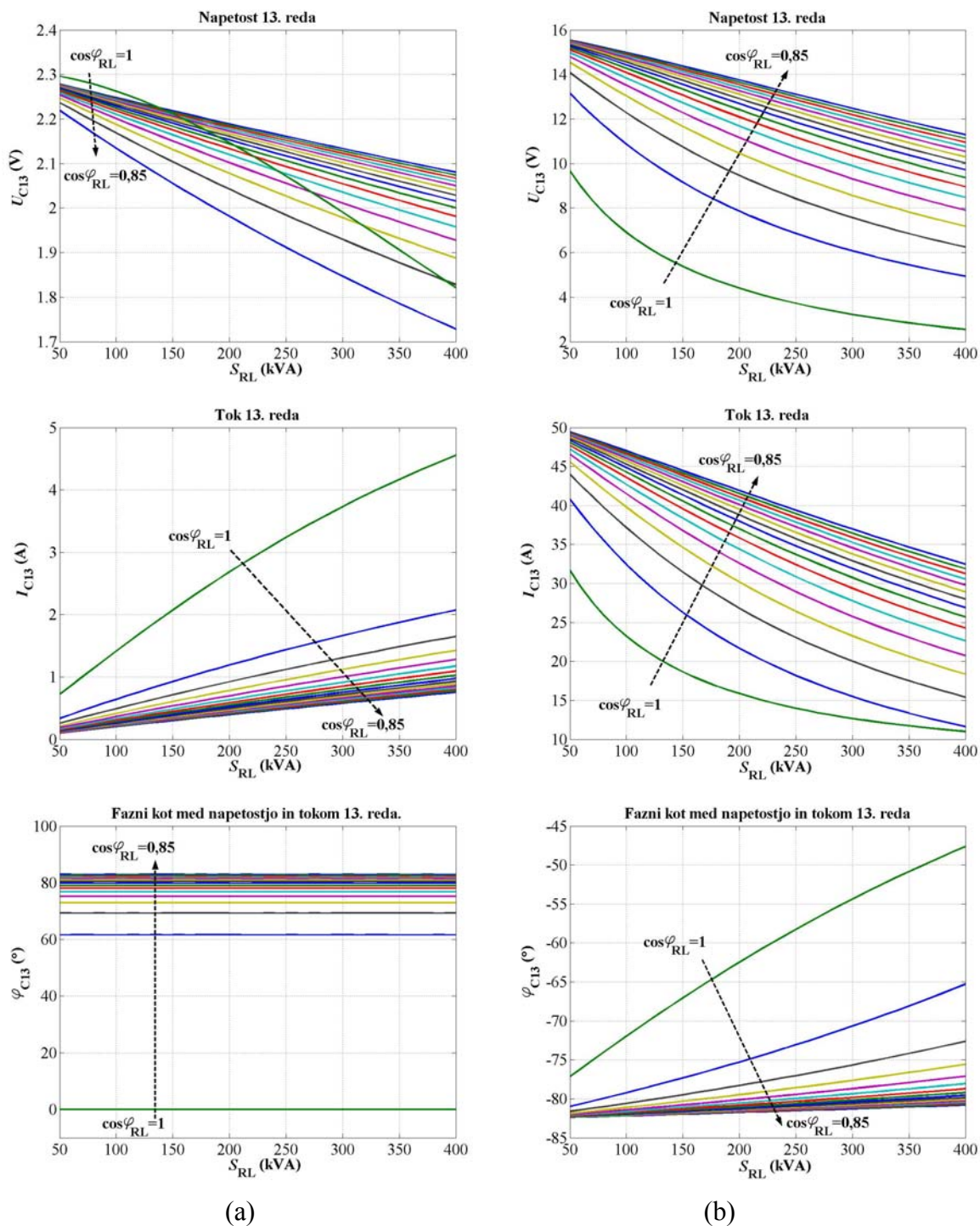
Slika 3.14: Prispevek omrežja (a) in porabnika (b) k 5. harmonski komponenti toka na PM v odvisnosti od bremena porabnika

Kot je razvidno s slike 3.13 b, je del odgovornosti za napetostno popačenje 5. reda na strani porabnika, ki s priključitvijo kondenzatorja povzroči spremembo impedančnih frekvenčnih karakteristik in s tem ojačenje 5. harmonske komponente napetosti na PM. Odgovornost za napetostno popačenje se s spremembo  $R$ - $L$  bremena porabnika spreminja, ker se spreminjajo tudi impedančne karakteristike. Ne glede na  $R$ - $L$  breme se razmeroma majhna odgovornost porabnika (nekje do 15 odstotkov) za napetostno harmonsko popačenje 5. reda ohranja in je najizrazitejša pri čisto ohmskem karakterju  $R$ - $L$  bremena.

S spremembo bremena in s tem impedančnih karakteristik se spreminja tudi odgovornost za tokovno popačenje 5. reda. Odgovornost za tokovno popačenje 5. reda je pri manjših vrednostih  $R-L$  bremena večinoma na strani porabnika oziroma se delež odgovornosti razdeli na omrežje in porabnika. S povečevanjem navidezne moči in slabšanjem faktorja moči bremena se odgovornost za tokovno popačenje 5. reda prenese na stran omrežja, medtem ko porabnik kompenzira harmonik oziroma je negativen njegov prispevek k tokovnemu popačenju 5. reda, ki nakazuje na povečano induktivno komponento bremena in posledično zmanjšanje 5. harmonske komponente toka na PM.

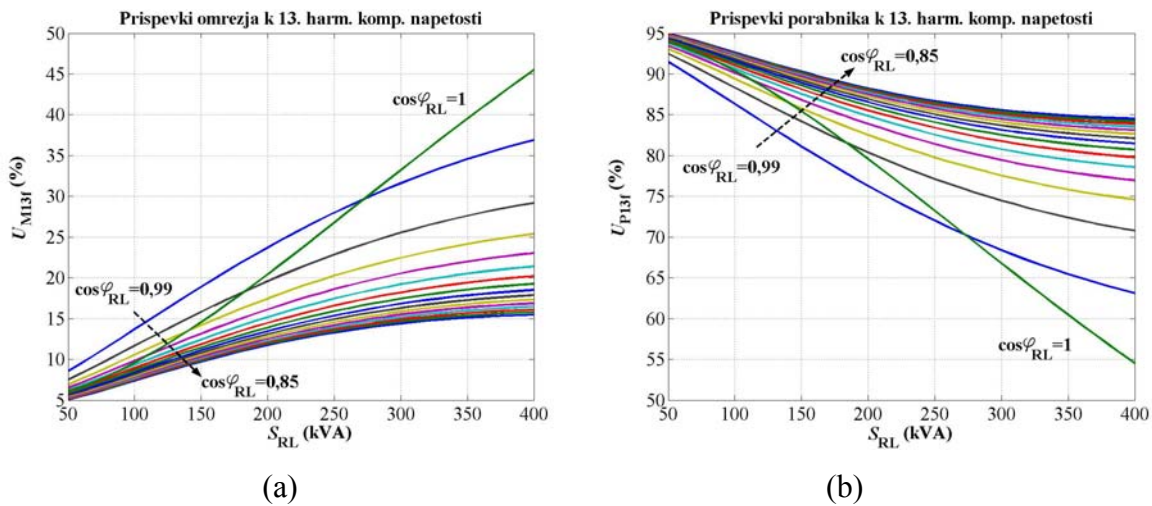
Glede na frekvenčne karakteristike na sliki 3.8 a oziroma 3.8 b obstaja resonančna točka okoli frekvence 650 Hz oziroma 13. harmonske komponente. Na sliki 3.15 so prikazane vrednosti napetosti, toka in faznega kota 13. harmonske komponente na PM pri izključenem (slika 3.15 a) in priključenem (slika 3.15 b) kondenzatorju na strani porabnika.

Primerjava razmer pred priključitvijo kondenzatorja in po njej pokaže, da se harmonsko popačenje 13. reda s priključitvijo kondenzatorja ojači, kar je posledica spremenjenih impedančnih karakteristik in ustvarjanja resonančnih pogojev okoli 13. harmonske komponente. V danem primeru nastopi serijska resonanca, zato je vrednost impedance v resonančni točki najnižja, kar pomeni, da lahko že razmeroma majhen vir napetostnega harmonskega popačenja 13. reda na strani omrežja povzroči velike harmonske tokove 13. reda. Z ojačenjem 13. harmonske komponente toka se posledično ojači tudi 13. harmonska komponenta napetosti. S slike 3.15 je razvidno posebej izrazito ojačenje 13. harmonske komponente toka. Razmere so slabše pri majhnih močeh  $R-L$  bremena in slabših faktorjih moči, kar je razvidno tudi iz impedančnih frekvenčnih karakteristik, prikazanih na sliki 3.8. S povečevanjem navidezne moči  $R-L$  bremena se vrednost impedance povečuje, resonančna točka pa se pomika proti višjim frekvencam.

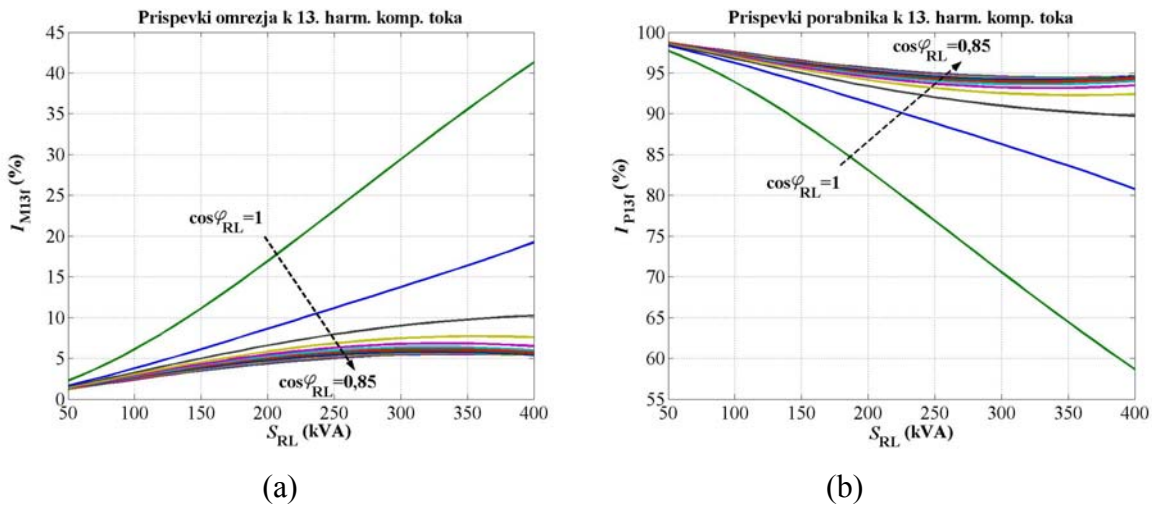


Slika 3.15: Napetost, tok in fazni kot 13. harmonske komponente na PM pred priključitvijo kondenzatorja oziroma kompenzatorja jalove energije pri porabniku (a) in po njej (b)

Prispevki oziroma odgovornost omrežja in porabnika za napetostno in tokovno harmonsko popačenje 13. reda, izračunana z metodo harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami, pri vključenem kondenzatorju na strani porabnika, je ponazorjena na slikah 3.16 in 3.17.



Slika 3.16: Prispevki omrežja (a) in porabnika (b) k 13. harmonski komponenti napetosti na PM v odvisnosti od R-L bremena porabnika



Slika 3.17: Prispevki omrežja (a) in porabnika (b) k 13. harmonski komponenti toka na PM v odvisnosti od R-L bremena porabnika

Rezultati napetostnih in tokovnih prispevkov k 13. harmonski komponenti kažejo, da je za ojačenje 13. harmonske komponente kot posledice resonance v največji meri odgovoren porabnik. Odgovornost porabnika se spreminja skladno s spreminjanjem bremena in s tem impedančnih karakteristik, kjer se z naraščanjem navidezne moči in faktorja moči R-L bremena resonančna točka pomika proti višjim frekvencam, s tem pa je manjše tudi ojačenje 13. harmonske komponente. Odgovornost porabnika za harmonsko popačenje 13. reda se s tem zmanjšuje.



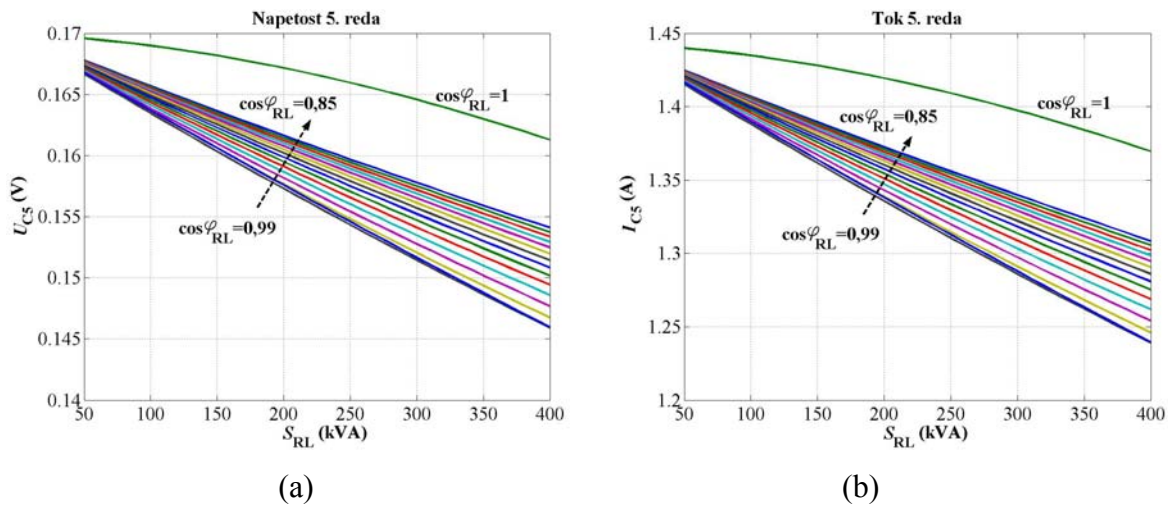
Glede na rezultate lahko ugotovimo, da metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami logično ovrednoti odgovornost za harmonsko popačenje v resonančnih razmerah. Metoda pokaže, da je za ojačitev harmonskega popačenja zaradi resonance odgovoren povzročitelj nastalih resonančnih razmer, ki bi bil dolžan v tem primeru napako tudi odpraviti oziroma poskrbeti za ustrezno izboljšanje razmer glede harmonskega popačenja.

### 3.2 Harmonski vir samo na strani porabnika

V nadaljevanju je v modelu omrežja harmonski vir popačenja samo na strani porabnika. Obravnavan je vpliv spremembe  $R$ - $L$  bremena in harmonskega vira na harmonsko popačenje ter vpliv spremembe impedance na strani omrežja. Harmonski vir na strani porabnika je predstavljen kot tokovni vir 5. harmonske komponente (250 Hz), z efektivno vrednostjo  $I_{P5} = 1,443$  A. Impedance na strani omrežja in porabnika se spreminjajo glede na obravnavani primer. Rezultati metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami oziroma izračunana odgovornost porabnika in omrežja za harmonsko popačenje na PM je podana v odstotkih in predstavlja odstotni delež izmerjene napetosti oziroma toka na PM (slika 2.4).

#### 3.2.1 Vpliv spremembe linearne bremena in harmonskega vira

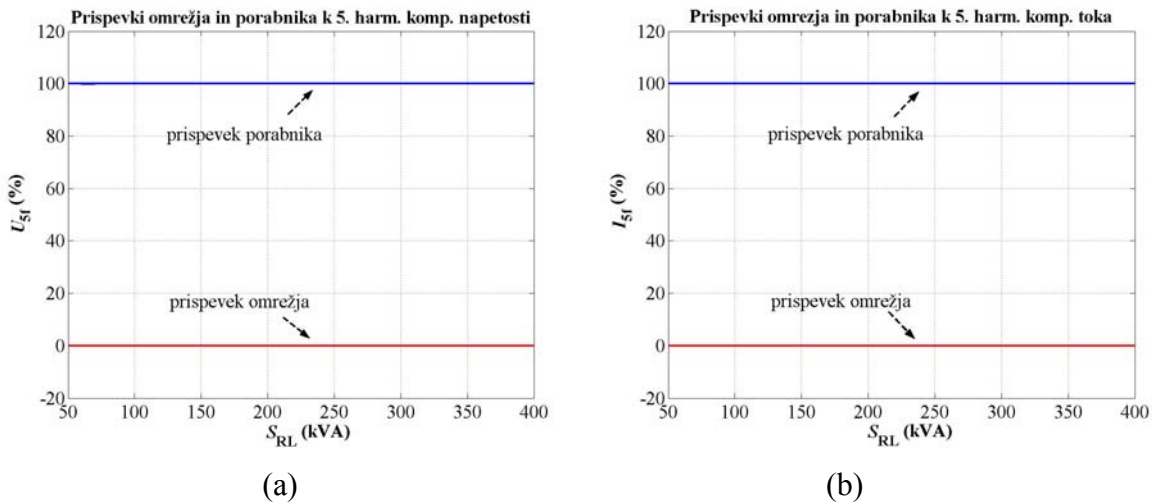
Na strani omrežja v danem primeru ni vira harmonskega popačenja. Impedanca omrežja, ki je hkrati tudi referenčna impedanca omrežja, se v tem primeru ne spreminja. Absolutna vrednost omrežne impedance je pri osnovni frekvenci  $|\underline{Z}_{M1}| = 0,024 \Omega$ , s faktorjem moči  $\cos\varphi_{M1} = 0,196$ . Vrednost omrežne impedance 5. harmonske komponente je izračunana po enačbi (59). Na strani porabnika je priključeno linearno  $R$ - $L$  breme, ki se mu spreminja navidezna moč od  $S_{RL} = 50$ – $400$  kVA, medtem ko se faktor moči spreminja od  $\cos\varphi_{RL} = 0,85$ – $1$ . Referenčne impedance porabnika so izračunane iz napetosti in toka osnovne harmonske komponente na PM (enačbi (52) in (53)). Vrednosti 5. harmonske komponente napetosti in toka na PM v odvisnosti od bremena porabnika so prikazane na sliki 3.18.



Slika 3.18: 5. harmonska komponenta napetosti (a) in toka (b) na PM

Kot med napetostjo in tokom 5. harmonske komponente na PM znaša  $-92,29^\circ$  in je neodvisen od spremembe bremena oziroma impedance porabnika.

Rezultati metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami za 5. harmonsko komponento so prikazani na sliki 3.19 a (napetostni prispevki) in 3.19 b (tokovni prispevki).



Slika 3.19: Prispevki oziroma odgovornost za 5. harmonsko komponento napetosti(a) in toka (b) na PM pri spremembi impedance na strani porabnika

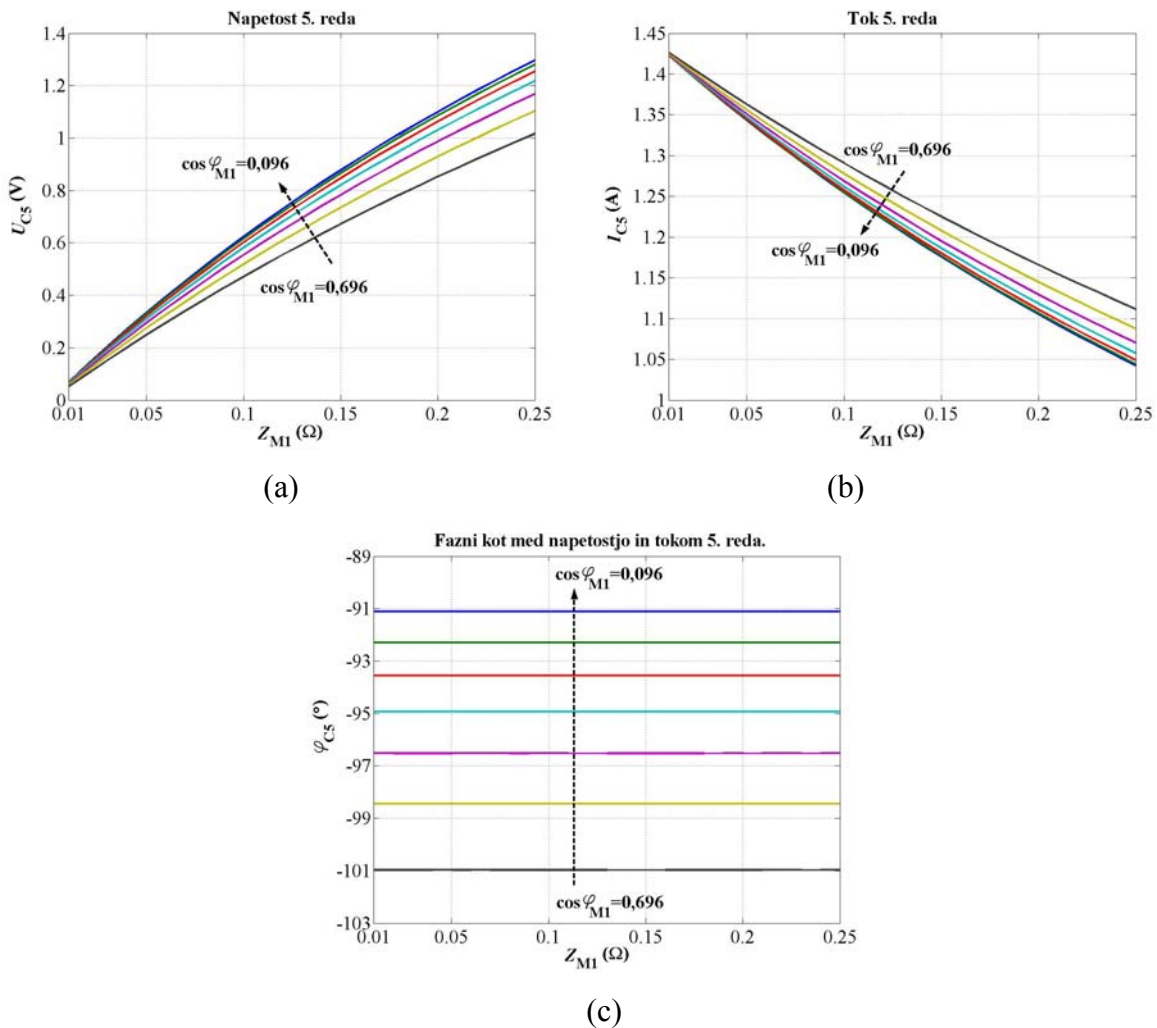
Odgovornost porabnika in omrežja je neodvisna od spremembe impedance porabnika. Iz rezultatov je razvidno, da je porabnik v celoti odgovoren za harmonsko popačenje 5. reda na PM ne glede na spremembo bremena oziroma impedance na strani porabnika.

Rezultati so enaki tudi v primeru spreminjanja harmonskega vira na strani porabnika, zato v doktorski nalogi niso posebej navedeni. Rezultati prispevkov k osnovni harmonski komponenti so enaki, kot so bili navedeni in razloženi že v razdelku 3.1.2.1.

### 3.2.2 Vpliv spremembe impedance omrežja

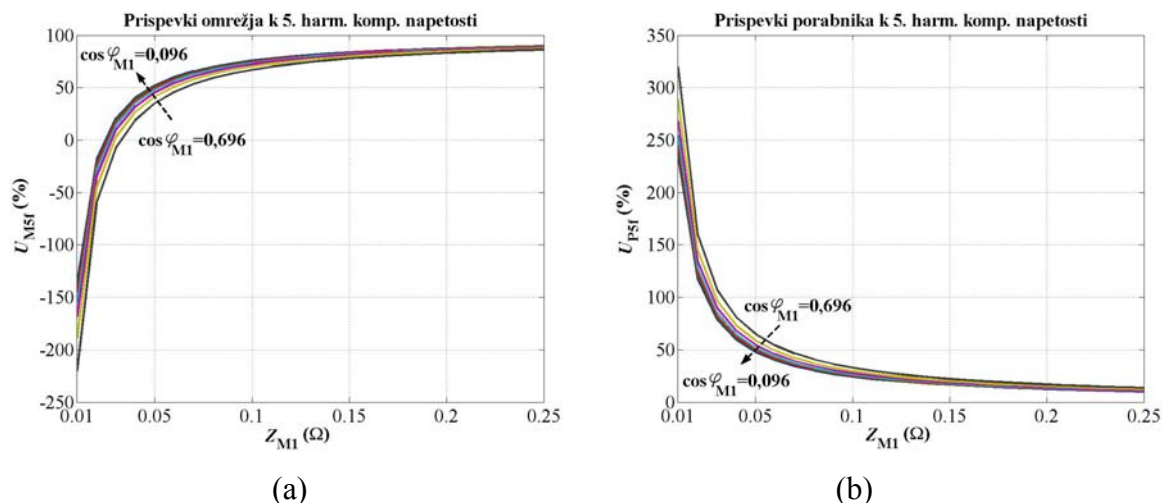
Sprememba impedance na strani omrežja vpliva na harmonsko popačenje na PM, ki ga povzroča harmonski vir na strani porabnika. V obravnavanem primeru je breme porabnika konstantno  $S_{RL} = 100$  kVA,  $\cos\varphi_{RL} = 0,95$ . Referenčne impedance porabnika so izračunane iz napetosti in toka osnovne harmonske komponente na PM (enačbi (52) in (53)). Vrednost referenčne impedance na strani porabnika znaša v primeru izračuna tokovnih prispevkov  $Z_{P5-ref} = 1,684 \Omega$ . Pri izračunu odgovornosti oziroma prispevkov k napetostnemu harmonskemu popačenju je referenčna impedanca porabnika enaka  $Z_{P5-ref}^* = 1,52 \Omega$ .

Impedanca osnovne frekvence na strani omrežja se spreminja po absolutni vrednosti  $|Z_{M1}| = 0,01-0,25 \Omega$  in faktorju moči  $\cos\varphi_{M1} = 0,096-0,696$ . Referenčna impedanca osnovne frekvence na strani omrežja je določena kot  $|Z_{M1-ref}| = 0,024 \Omega$  s faktorjem moči  $\cos\varphi_{M1-ref} = 0,196$ . Vrednost omrežne impedance 5. harmonske komponente je izračunana po enačbi (59). Napetost, tok in pripadajoči vmesni fazni kot 5. harmonske komponente, izmerjene na PM, v odvisnosti od impedance omrežja, so podani na slikah 3.20 a, 3.20 b in 3.20 c.

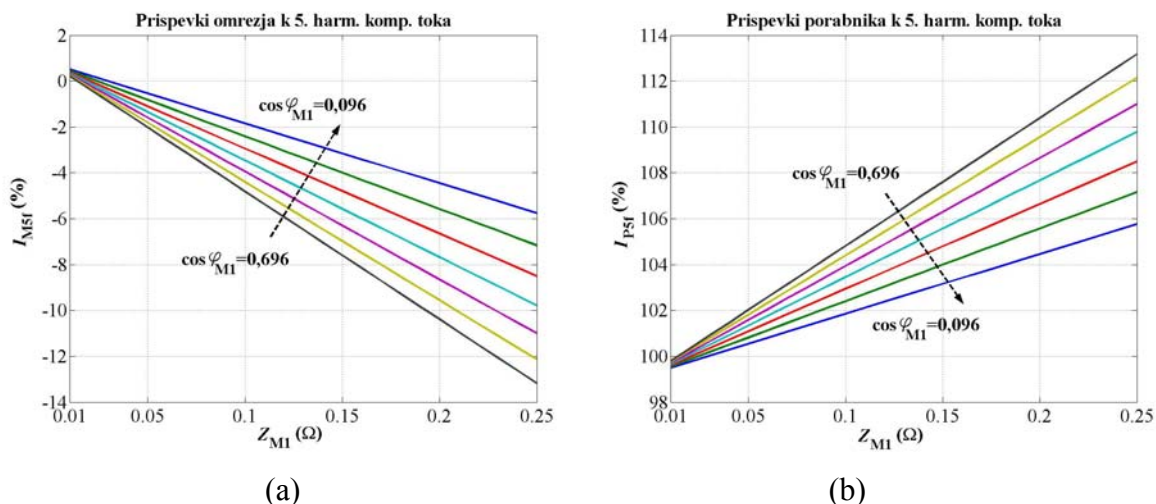


Slika 3.20: Vrednosti 5. harmonske komponente napetosti (a), toka (b) in faznega kota (c) na PM

Z naraščanjem absolutne vrednosti impedance omrežja se na PM povečuje tudi 5. harmonska komponenta napetosti. Glede na to, da porabnik ne vpliva na spremembo impedance omrežja, se povečanje harmonskega popačenja ne sme odraziti v povečani odgovornosti porabnika. Na sliki 3.21 so podani prispevki porabnika in omrežja k 5. harmonski komponenti napetosti. Na sliki 3.22 so podani prispevki k 5. harmonski komponenti toka v odvisnosti od impedance omrežja.



Slika 3.21: Prispevki oziroma odgovornost omrežja (a) in porabnika (b) za 5. harmonsko komponento napetosti na PM pri spremembi impedance na strani omrežja



Slika 3.22: Prispevki oziroma odgovornost omrežja (a) in porabnika (b) za 5. harmonsko komponento toka na PM pri spremembi impedance na strani omrežja

Rezultati metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami kažejo, da se odgovornost omrežja za napetostno popačenje na PM povečuje s povečevanjem impedance na strani omrežja. Zaradi spremembe impedance omrežja se povečuje vrednost 5. harmonske komponente napetosti na PM, torej je povečana odgovornost omrežne strani povsem upravičena in logična, saj porabnik ne vpliva na spremembo impedance na strani omrežja. Odgovornost za tokovno harmonsko popačenje 5. reda je v celoti na strani porabnika. S povečevanjem absolutne vrednosti omrežne impedance se povečuje negativni prispevek omrežja oziroma omrežje prispeva k zmanjševanju 5. harmonske komponente toka.

### 3.3 Harmonski vir na strani porabnika in omrežja

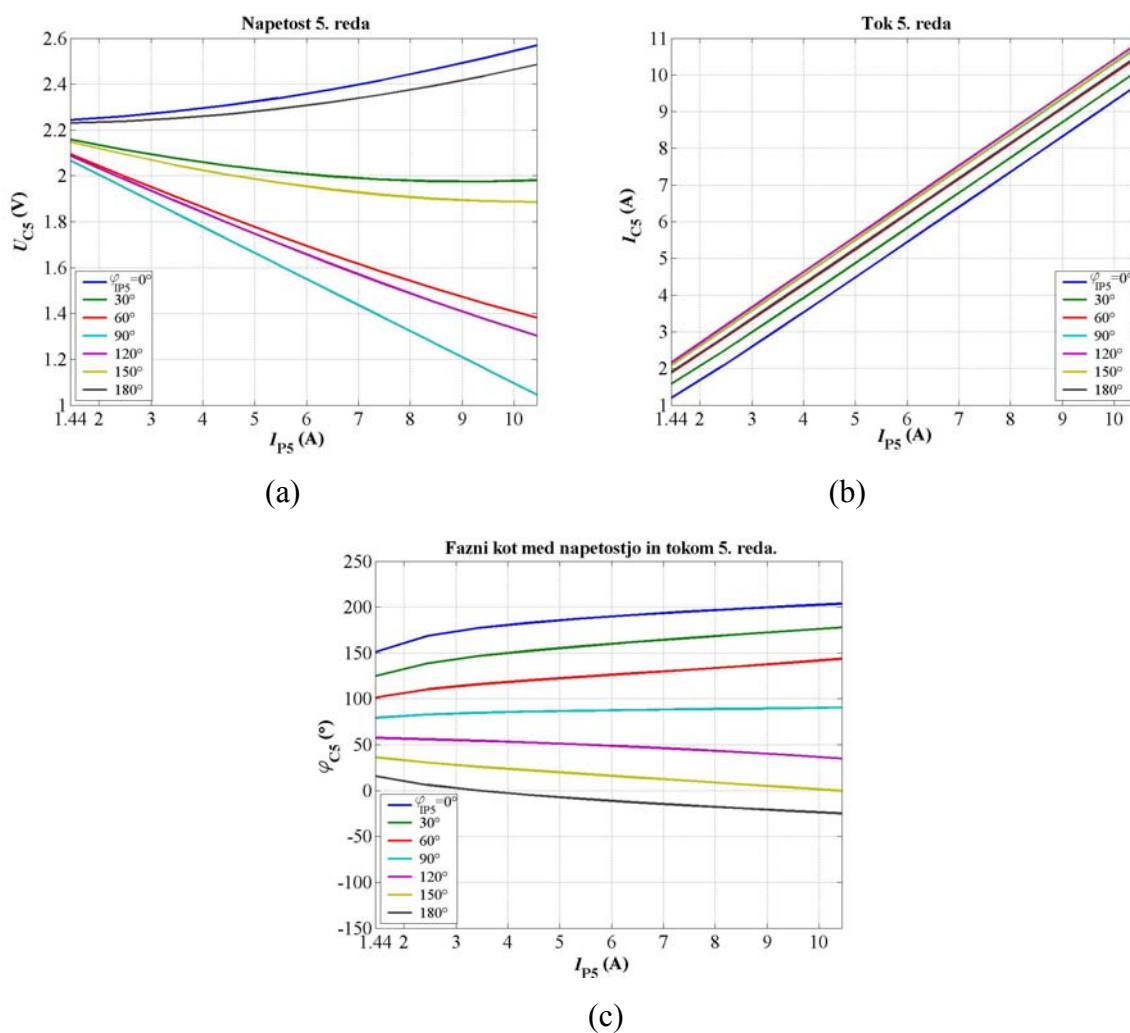
V praksi je zagotovo najpogostejši primer, ko so viri harmonskega popačenja tako na strani omrežja kot na strani porabnika. Tak primer je obravnavan v nadaljevanju, kjer sta na strani porabnika in omrežja obravnavana vira 5. harmonske komponente.

#### 3.3.1 Vpliv spremembe harmonskega vira na strani porabnika

Efektivna vrednost napetosti harmonskega vira na strani omrežja je enaka  $U_{M5} = 2,31$  V ( $\varphi_{UM5} = 0^\circ$ ), medtem ko je na strani porabnika priključen tokovni harmonski vir, ki se mu efektivna vrednost spreminja od  $I_{P5} = 1,44\text{--}10,44$  A. Ob virih popačenja na obeh straneh je zelo pomemben tudi fazni kot proizvedenega harmonskega toka ali napetosti, saj se lahko, v odvisnosti od faznega kota posameznega vira, harmonsko popačenje poveča ali zmanjša. Glede na navedeno je v obravnavanem primeru fazni kot tokovnega harmonskega vira na strani porabnika spreminjan od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ , s korakom po  $30^\circ$ .

Na strani porabnika je priključeno linearno  $R$ - $L$  breme moči  $S_{RL} = 100$  kVA,  $\cos\varphi_{RL} = 0,95$ . Na strani omrežja sta absolutna vrednost referenčne impedance osnovne frekvence in pripadajoči faktor moči enaka dejanski omrežni impedanci osnovne frekvence  $|\underline{Z}_{M1}| = |\underline{Z}_{M1\text{-ref}}| = 0,024$   $\Omega$  in  $\cos\varphi_{M1} = \cos\varphi_{M1\text{-ref}} = 0,196$ .

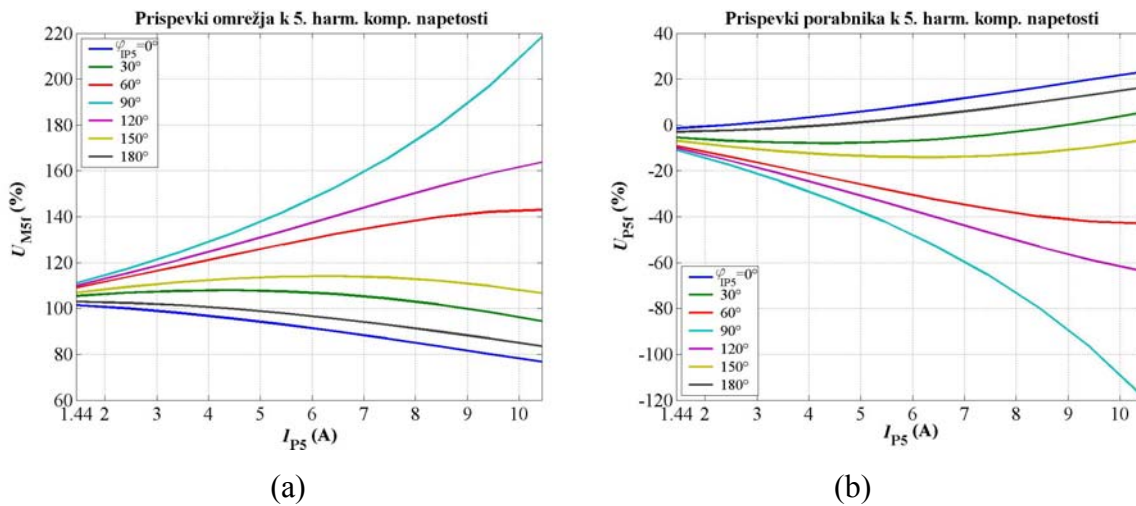
Vrednosti 5. harmonske komponente napetosti, toka in faznega kota na PM, v primeru harmonskih virov na strani omrežja in porabnika, so prikazane na sliki 3.23.



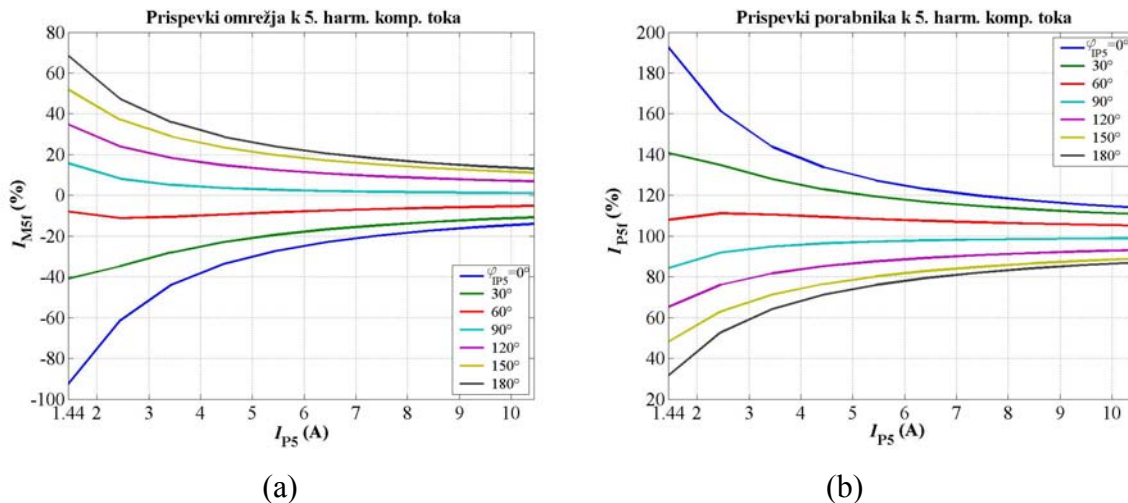
Slika 3.23: Vrednosti 5. harmonske komponente napetosti (a), toka (b) in faznega kota (c) na PM

S slike 3.23 a je razvidno, da se pri faznem kotu tokovnega harmonskega vira na strani porabnika  $\varphi_{IP5} = 0^\circ$  5. harmonska komponenta napetosti ojači oziroma se harmonska vira 5. harmonske komponente seštevata. Pri faznem kotu  $\varphi_{IP5} = 90^\circ$  tokovnega vira na strani porabnika se napetostno popačenje 5. reda z naraščanjem amplitude toka vira na strani porabnika zmanjšuje oziroma se harmonska vira medsebojno izničujeta. Prispevki oziroma odgovornost omrežja in porabnika za napetostno harmonsko popačenje 5. reda na PM je ponazorjena na sliki 3.24. Prispevki k tokovnemu harmonskemu popačenju 5. reda na PM so prikazani na sliki 3.25.





Slika 3.24: Prispevki oziroma odgovornost omrežja (a) in porabnika (b) za 5. harmonsko komponento napetosti na PM pri harmonskih virih na strani porabnika in omrežja



Slika 3.25: Prispevki oziroma odgovornost omrežja (a) in porabnika (b) za 5. harmonsko komponento toka na PM pri harmonskih virih na strani porabnika in omrežja

Odgovornost omrežja za 5. harmonsko komponento napetosti pri  $\varphi_{PS} = 0^\circ$  pada z naraščanjem toka harmonskega vira na strani porabnika. Harmonsko popačenje napetosti na PM se v tem primeru ojači (slika 3.23 a), za kar je odgovoren harmonski vir na strani porabnika ki mu amplituda toka narašča, posledično pa se povečuje tudi amplituda napetosti 5. harmonske komponente na PM. V primeru faznega premika tokovnega vira na strani porabnika ( $\varphi_{PS} = 90^\circ$ ) je situacija ravno nasprotna in porabnik kompenzira 5. harmonsko komponento napetosti na PM. Napetostno popačenje na PM se zmanjšuje skladno z naraščanjem toka harmonskega vira na strani porabnika. Iz rezultatov na sliki 3.24 b je razvidno, da se odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti na PM zmanjšuje. Prispevki



porabnika dobijo negativni predznak, kar nakazuje na kompenzacijo oziroma zmanjšuje 5. harmonsko komponento napetosti na PM s strani porabnika.

Odgovornost za tokovno popačenje 5. reda na PM je v pretežni meri na strani porabnika. Pri faznem kotu tokovnega harmonskega vira na strani porabnika  $\varphi_{P5} \geq 90^\circ$  se del odgovornosti za tokovno popačenje prenese na stran omrežja, vendar se z naraščanjem toka 5. reda, ki ga proizvaja vir na strani porabnika, odgovornost omrežja zmanjšuje.

Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami podaja podobne rezultate tudi v primeru, ko se spreminja vir na strani omrežja. V tem primeru se odgovornost za spremembo harmonskega popačenja kot posledica spremembe omrežnega harmonskega vira prenese na stran omrežja. Rezultati so podobni kot v prejšnjem primeru, zato v nalogi niso posebej navedeni.

Na podlagi rezultatov je mogoče ugotoviti, da metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami podaja ustrezne rezultate tudi v primeru, ko so viri harmonskega popačenja na strani omrežja in porabnika ter se pri tem spreminjajo.



## **4 PRIMERJAVA IN PRAKTIČNA UPORABA METOD ZA DOLOČANJE ODGOVORNOSTI ZA HARMONSKO POPAČENJE**

V nadaljevanju je izvedena primerjava metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje, ki so bile predstavljene v 2. poglavju. Obravnavane so metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami, osnovna metoda harmonskih vektorjev, kjer so upoštevane dejanske impedance, in metoda, ki temelji na IEC 61000-3-6. V prvem delu je izvedena primerjava metod na preprostem modelu omrežja v programskem okolju MATLAB. V drugem delu je predstavljena praktična uporaba metod, kjer so podani rezultati tedenskih meritev harmonskega popačenja in odgovornosti zanj. Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami in metoda po IEC 61000-3-6 sta bili implementirani v merilni instrument Dewetron. Izračun po metodi harmonskih vektorjev z dejanskimi (ocenjenimi) impedancami je bil na podlagi meritev izveden naknadno v programskem okolju MATLAB. Meritve so bile izvedene na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, v transformatorski postaji TP Stara.

### **4.1 Primerjava metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje na preprostem modelu omrežja**

Primerjava metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje na PM je izvedena na modelu omrežja, ki je prikazan na sliki 2.1 oziroma 2.2. Model omrežja je opisan z matematičnimi enačbami v programskem okolju MATLAB. Obravnavana sta dva primera. Prvi vključuje harmonski vir 5. reda tako na strani omrežja kot na strani porabnika. V drugem primeru je izvedena primerjava metod v resonančnih razmerah, ki so posledica priključenega kondenzatorja na strani porabnika, porabnik pa ne vsebuje vira harmonskega popačenja.

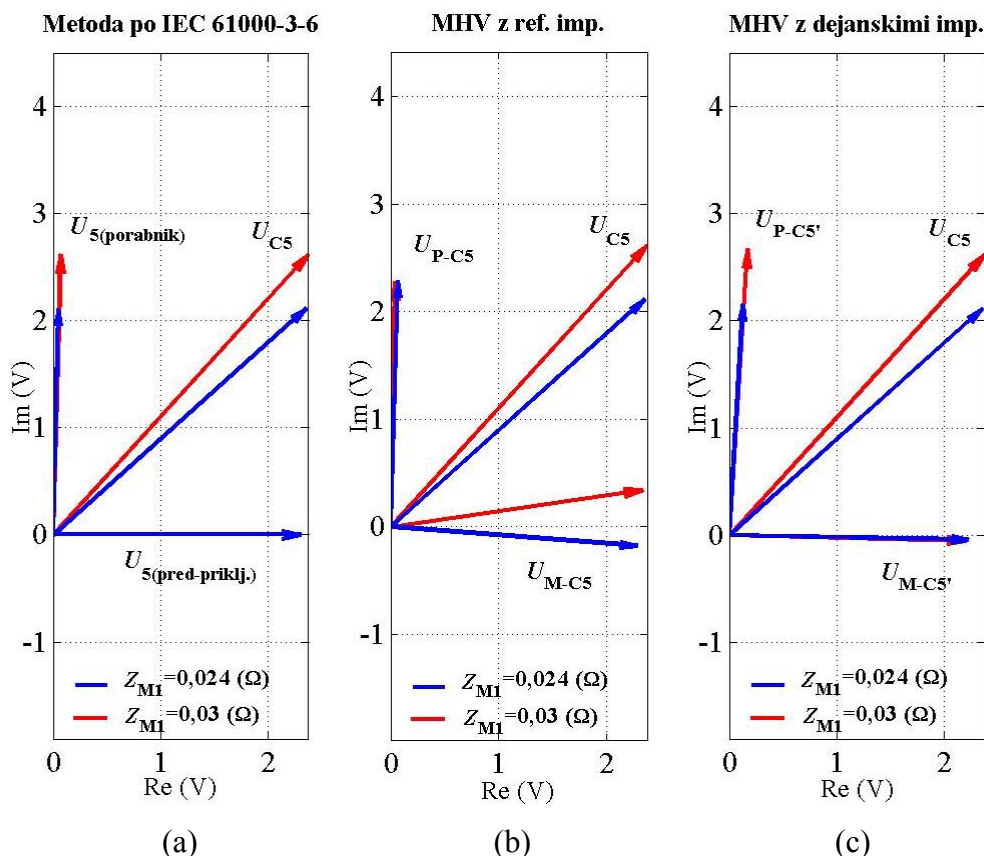
V vseh primerih je obravnavano samo harmonsko popačenje napetosti.

#### 4.1.1 Primerjava metod - harmonski vir na strani porabnika in omrežja

Na strani omrežja je priključen napetostni harmonski vir z efektivno vrednostjo 5. harmonske komponente  $U_{M5} = 2,31$  V in  $\varphi_{UM5} = 0^\circ$ , medtem ko je na strani porabnika priključen tokovni harmonski vir 5. harmonske komponente toka  $I_{P5} = 19$  A,  $\varphi_{IP5} = 0^\circ$ . Porabnik je ponazorjen z linearnim  $R$ - $L$  bremenom moči  $S_{RL} = 100$  kVA,  $\cos\varphi_{RL} = 0,95$ . Na strani omrežja sta absolutna vrednost omrežne impedance osnovne frekvence in pripadajoči faktor moči enaka  $|\underline{Z}_{M1}| = 0,024$   $\Omega$  in  $\cos\varphi_{M1} = 0,196$ . Kot je bilo že omenjeno, se s spreminjanjem impedance na strani porabnika ali na strani omrežja spreminja tudi harmonsko popačenje. Porabnik ne more biti odgovoren za povečanje ali zmanjšanje harmonskega popačenja, če je to posledica spremembe impedance na strani omrežja. Primerjava metod v tem primeru obsega spremembo absolutne vrednosti omrežne impedance. Absolutna vrednost omrežne impedance se spremeni na vrednost  $|\underline{Z}_{M1}| = 0,03$   $\Omega$ , medtem ko faktor moči ostane nespremenjen ( $\cos\varphi_{M1} = 0,196$ ).

Referenčna impedance osnovne frekvence na strani omrežja in pripadajoči faktor moči sta enaka  $|\underline{Z}_{M1-ref}| = 0,024$   $\Omega$  in  $\cos\varphi_{M1-ref} = 0,196$ .

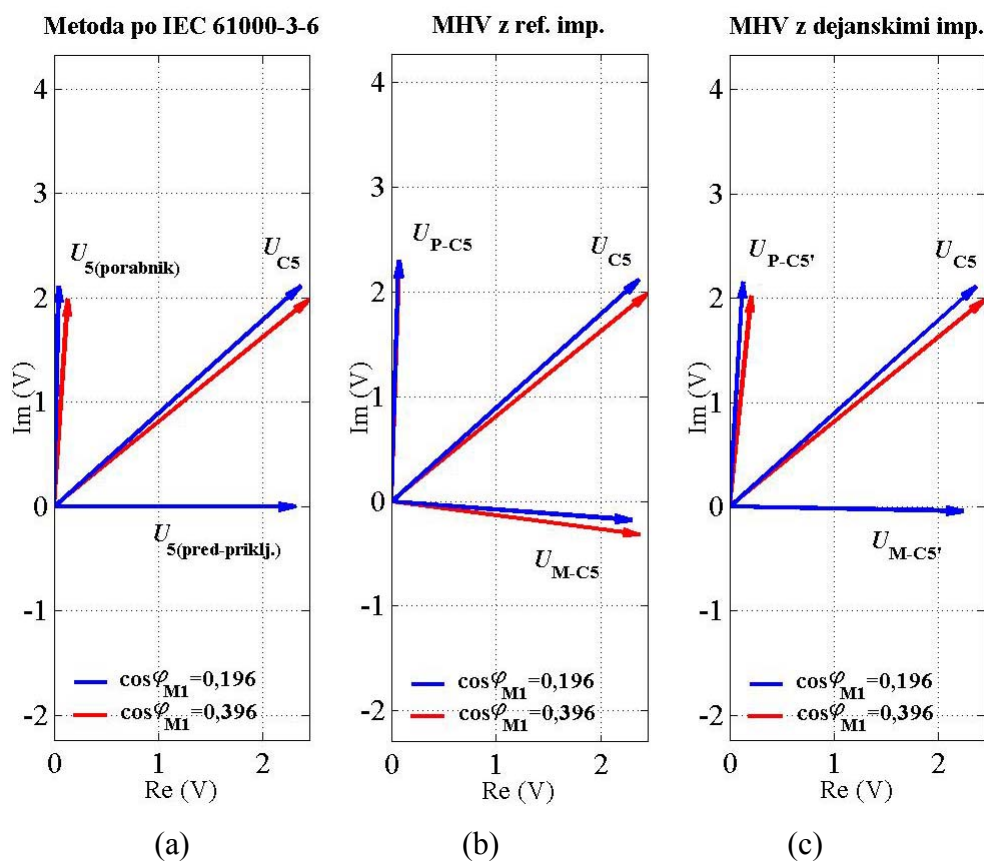
Harmonski napetostni vektorji, izračunani s posameznimi metodami, so ponazorjeni na sliki 4.1.



Slika 4.1: Diagrami napetostnih vektorjev pri spremembi absolutne vrednosti omrežne impedance

Ob povečanju absolutne vrednosti omrežne impedance se izmerjena vrednost napetosti 5. harmonske komponente na PM ( $U_{C5}$ ) poveča. Absolutna vrednost vektorja izmerjene napetosti na PM ( $|U_{C5}|$ ) je enaka efektivni vrednosti napetosti ( $U_{C5}$ ). Primerjava različnih metod pokaže, da MHV z dejanskimi impedancami in metoda po IEC 6100-3-6 dajeta zelo podobne rezultate (sliki 4.1 a in 4.1 c). Napetostna vektorja 5. reda, ki predstavljata emisijo popačenja s strani porabnika ( $\underline{U}_{5\text{porabnik}}$  in  $\underline{U}_{P-C5}$ ), se pri obeh metodah povečata, ko se spremeni absolutna vrednost omrežne impedance. To pomeni, da se sprememba harmonskega popačenja zaradi spremembe impedance omrežja odrazi na povečani odgovornosti porabnika. Porabnik ne vpliva na spremembo impedance omrežja, zato povečana odgovornost porabnika ni smiselna. Kot je razvidno s slike 4.1 b, se pri danem primeru pokaže prednost MHV z referenčnimi impedancami, kjer ostane napetostni vektor 5. reda ( $\underline{U}_{P-C5}$ ) praktično nespremenjen in je odgovornost za povečanje 5. harmonske komponente napetosti na strani omrežja.

Na podoben način lahko preverimo tudi odvisnost posameznih metod od spremembe faktorja moči impedance omrežja  $\cos\varphi_{M1}$ . Faktor moči se v danem primeru spremeni iz  $\cos\varphi_{M1} = 0,196$  na  $\cos\varphi_{M1} = 0,396$ . Absolutna vrednost omrežne impedance je  $|\underline{Z}_{M1}| = 0,024 \Omega$ . Referenčna impedance osnovne frekvence na strani omrežja in pripadajoči faktor moči ostaneta enaka kot v prejšnjem primeru, in sicer  $|\underline{Z}_{M1-ref}| = 0,024 \Omega$  in  $\cos\varphi_{M1-ref} = 0,196$ . Harmonski napetostni vektorji, izračunani s posameznimi metodami, so podani na sliki 4.2.



Slika 4.2: Diagrami napetostnih vektorjev pri spremembi  $\cos\varphi_{M1}$  omrežne impedance

Tudi v tem primeru je s slik razvidno, da se v primeru metode po IEC 61000-3-6 in MHV z dejanskimi impedancami sprememba  $\cos\varphi_{M1}$  omrežne impedance odraža na spremembi harmonskih napetostnih vektorjev porabnika. Majhno zmanjšanje efektivne vrednosti 5. harmonske komponente napetosti na PM ( $U_{C5}$ ) se odrazi v zmanjšanih napetostnih vektorjih, ki predstavljata emisijo popačenja s strani porabnika ( $\underline{U}_{5porabnik}$  na sliki 4.2 a in  $\underline{U}_{P-C5'}$  na sliki 4.2 c). Ponovno lahko ugotovimo, da v primeru MHV z referenčnimi impedancami (slika

4.2 b) sprememba impedance omrežja praktično ne vpliva na vektor  $\underline{U}_{P-C5}$ , ki predstavlja emisijo napetostnega popačenja porabnika.

Absolutne vrednosti napetostnih vektorjev porabnika in odstotne vrednosti odgovornosti porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti na PM, izračunane po posameznih metodah, so navedene v tabeli 4.1. Odstotne vrednosti odgovornosti so izračunane glede na absolutno vrednost izmerjene harmonske napetosti na PM ( $|\underline{U}_{C5}|$ ) oziroma glede na efektivno vrednost izmerjene harmonske napetosti ( $U_{C5}$ ).

Tabela 4.1: Odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti pri spremembi impedance na strani omrežja

	PM	Metoda po IEC 61000-3-6		MHV z ref. imp.		MHV z dejanskimi imp.	
	$U_{C5}$ (V)	$ \underline{U}_{5\text{-porabnik}} $ (V)	$U_{P5f}^*$ (%)	$ \underline{U}_{P-C5} $ (V)	$U_{P5f}$ (%)	$ \underline{U}_{P-C5} $ (V)	$U_{P5f}$ (%)
$ \underline{Z}_{M1} =0,024 \Omega$ , $\cos\varphi_{M1}=0,196$	3,17	2,12	45,7	2,29	49,9	2,16	48,5
$ \underline{Z}_{M1} =0,03 \Omega$	3,54	2,62	56,1	2,28	48,4	2,68	59,1
$\cos\varphi_{M1}=0,396$	3,15	1,99	43,0	2,30	48,0	2,03	45,6

Odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti, izražena v odstotkih, nam kaže, da je MHV z referenčnimi impedancami v primerjavi z metodo po IEC 61000-3-6 oziroma MHV z dejanskimi impedancami robustnejša in manj občutljiva na spremembo impedance na strani omrežja.

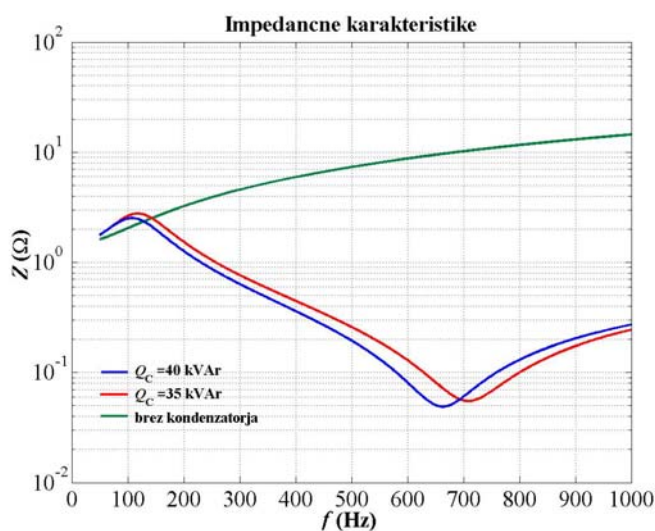
#### 4.1.2 Primerjava metod – resonančne razmere

Primerjava metod temelji na primeru, ki je bil obravnavan že v razdelku 3.1.2.2, kjer je vir harmonskega popačenja na strani omrežja, porabnik pa ima priključeno kompenzacijo jalove energije oziroma kondenzator. Resonančna točka je okrog frekvence 650 Hz oziroma 13. harmonske komponente. Ker v tem primeru primerjamo različne metode določanja odgovornosti za harmonsko popačenje v resonančnih razmerah, je obravnavana samo 13. harmonska komponenta. Efektivna vrednost napetosti vira 13. harmonske komponente na strani omrežja je enaka  $U_{M13} = 2,31$  V. Na strani porabnika ni vira harmonskega popačenja,

porabnik pa ima priključeno linearno  $R$ - $L$  breme ( $S_{RL} = 100$  kVA,  $\cos\varphi_{RL} = 0,9$ ), kateremu je vzporedno priključen tudi kompenzator jalove energije ( $Q_C = 40$  kVAr). Ker kondenzator pomembno vpliva na impedančno frekvenčno karakteristiko in posledično na harmonsko popačenje, je v drugem primeru velikost kondenzatorja spremenjena na vrednost  $Q_C = 35$  kVAr. Skupni faktor moči porabnika v primeru priključitve kondenzatorja znaša  $\cos\varphi = 0,999$  pri kondenzatorju  $Q_C = 40$  kVAr oziroma  $\cos\varphi = 0,995$  pri  $Q_C = 35$  kVAr.

Referenčne impedance porabnika so izračunane na podlagi vrednosti napetosti in toka osnovne frekvence na mestu priključitve porabnika v omrežje (enačbi (52) in (53)). Absolutna vrednost omrežne impedance je  $|\underline{Z}_{M1}| = 0,024 \Omega$ ,  $\cos\varphi_{M1} = 0,196$ . Referenčna impedance osnovne frekvence na strani omrežja je enaka dejanski impedanci, in sicer  $|\underline{Z}_{M1-ref}| = 0,024 \Omega$  in  $\cos\varphi_{M1-ref} = 0,196$ .

Impedančne karakteristike opazovane s strani omrežja v primeru kondenzatorja na strani porabnika so prikazane na sliki 4.3.

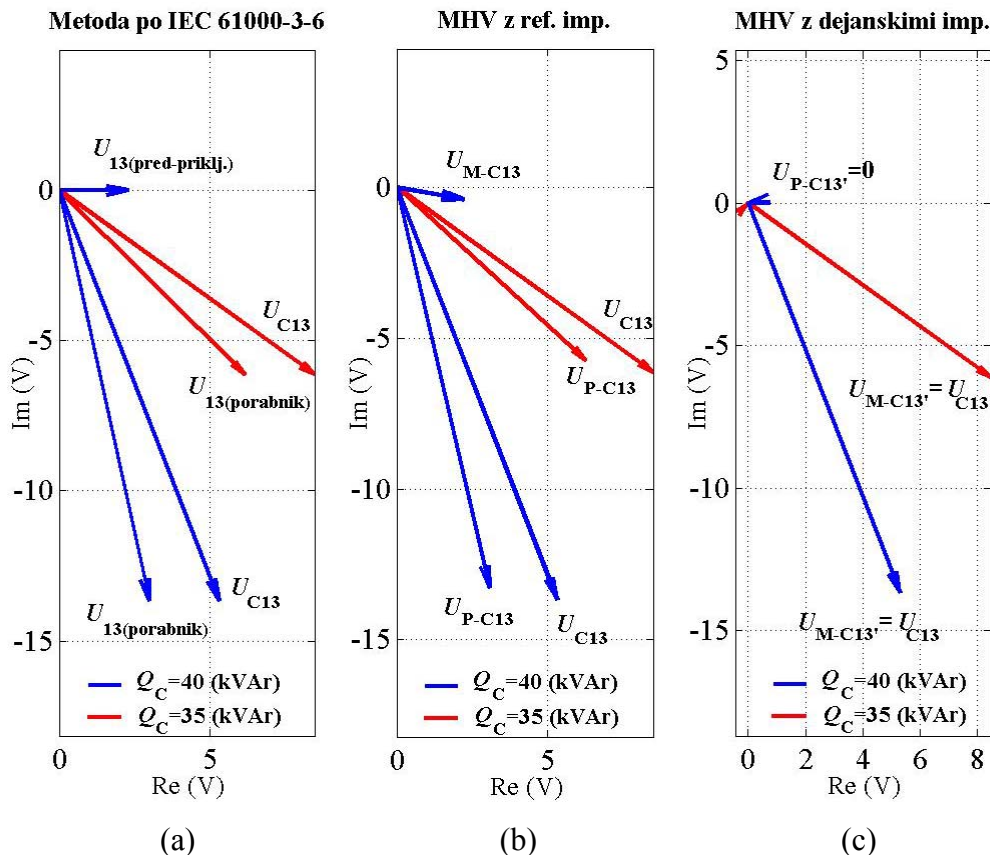


Slika 4.3: Impedančne frekvenčne karakteristike opazovane s strani omrežja v primeru kondenzatorja na strani porabnika

Absolutna vrednost impedance doseže najnižjo vrednost pri vključenem kondenzatorju okoli frekvence 650 Hz, torej je resonančna točka pri 13. harmonski komponenti. S spremembo velikosti kondenzatorja se resonančna točka premakne proti frekvenci 700 Hz. Zaradi premika resonančne točke se spremeni tudi harmonsko popačenje 13. reda na PM. Na sliki 4.4 so



prikazani harmonski napetostni vektorji, ki so izmerjeni na PM oziroma so določeni s posameznimi metodami.



Slika 4.4: Diagrami napetostnih vektorjev pri spremembi kondenzatorja na strani porabnika

13. harmonska komponenta napetosti, izmerjena na PM, se z vključitvijo kondenzatorja ( $Q_C = 40$  kVar) ojači z  $U_{C13} = 2,24$  V na  $U_{C13} = 14,66$  V. Izmerjena harmonska napetost 13. reda se s spremembo moči kondenzatorja ( $Q_C = 35$  kVar) zmanjša, saj se resonančna točka premakne k višjim frekvencam. Kot je razvidno s slik 4.4 a in 4.4 b dajeta MHV z referenčnimi impedancami in metoda po IEC 61000-3-6 zelo podobne rezultate. Obe metodi prikazeta povečano emisijo napetostnega popačenja s strani porabnika ( $\underline{U}_{13(\text{porabnik})}$ ,  $\underline{U}_{P-C13}$ ), ki je zaradi priključenega kondenzatorja odgovoren za povzročeno resonančno stanje in s tem ojačitev 13. harmonske komponente. Ko se zaradi spremenjene impedance porabnika resonančna točka premakne stran od 13. harmonske komponente, se odgovornost porabnika zmanjša. MHV z dejanskimi impedancami ne pokaže odgovornosti porabnika za ojačitev 13. harmonske komponente, temveč pokaže polno odgovornost omrežja. Omrežje v tem primeru ni odgovorno za nastalo situacijo, saj je ojačenje harmonskega popačenja posledica neustrezne impedance na strani porabnika. Absolutne vrednosti napetostnih vektorjev

porabnika in odstotne vrednosti odgovornosti porabnika za 13. harmonsko komponento napetosti, izračunane po posameznih metodah, so navedene v tabeli 4.2. Odstotne vrednosti odgovornosti so izračunane glede na absolutno vrednost izmerjene harmonske napetosti na PM ( $\underline{U}_{C13}$ ) oziroma glede na efektivno vrednost izmerjene harmonske napetosti ( $U_{C13}$ ).

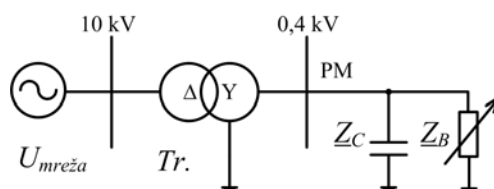
Tabela 4.2: Odgovornost porabnika za 13. harmonsko komponento napetosti pri spremembi kondenzatorja na strani porabnika

	PM	Metoda po IEC 61000-3-6		MHV z ref. imp.		MHV z dejanskimi imp.	
		$U_{C13}$ (V)	$ \underline{U}_{13\text{-porabnik}} $ (V)	$U_{P13f^*}$ (%)	$ \underline{U}_{P-C13} $ (V)	$U_{P13f}$ (%)	$ \underline{U}_{P-C13} $ (V)
$Q_C = 0$ kVAr	2,24	0,07	-3,3	0,46	1,4	0	0
$Q_C = 35$ kVAr	10,46	8,69	82,1	8,48	80,5	0	0
$Q_C = 40$ kVAr	14,66	13,99	94,3	13,63	92,0	0	0

MHV z referenčnimi impedancami in metoda po IEC 61000-3-6 omogočata pravilno oceno odgovornosti za harmonsko popačenje v primeru resonance, ki jo povzroči porabnik. Metodi izkazujeta odgovornost porabnika, čeprav na strani porabnika ni vira harmonskega popačenja, vendar pa porabnik z neustrezno impedanco povzroča ojačenje harmonskega popačenja na PM.

#### 4.2 Praktična uporaba in primerjava metod za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje

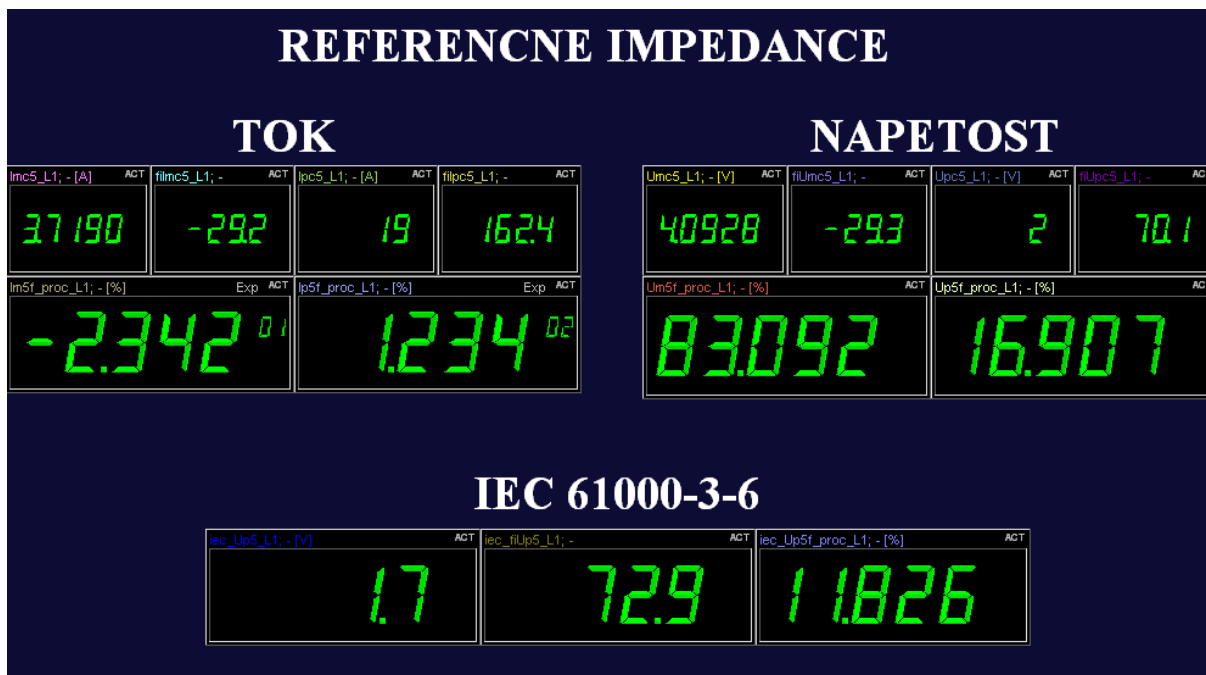
Praktična primerjava metod je bila izvedena na podlagi meritev, opravljenih v transformatorski postaji (10/0,4 kV) TP Stara na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Enopolna shema obravnavanega omrežja na tej fakulteti je prikazana na sliki 4.5.



Slika 4.5: Enopolna shema omrežja na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani – TP Stara

Fakulteta za elektrotehniko je v razdelilno omrežje priključena prek transformatorja 10/0,4 kV, vezave trikot/zvezda ( $\Delta/Y$ ). Nazivna moč transformatorja je 0,4 MVA in kratkostična napetost 4,9 %. Za transformator je privzeto razmerje med ohmsko in induktivno upornostjo  $(R/X)_{Tr} = 0,2$ . 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  $(R/X)_{TM} = 0,1$ .

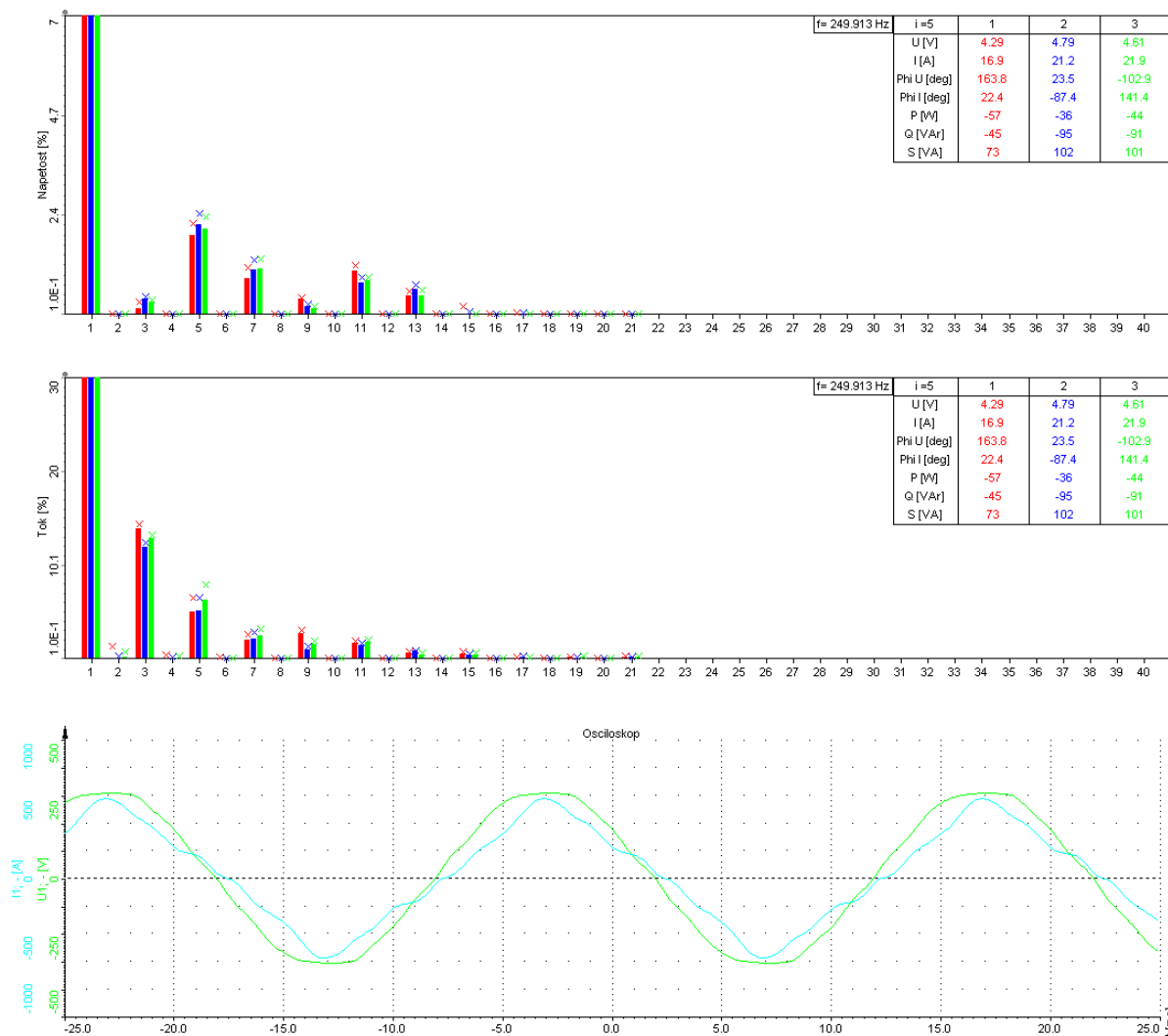
Meritve so bile opravljene na sekundarni strani transformatorja v TP Stara. V primeru [38] je bilo ugotovljeno, da na podlagi kratkotrajnih meritev ni smiselno ugotavljati odgovornosti za harmonsko popačenje, saj ne zajamemo vseh sprememb v napajalnem in porabniškem omrežju. Iz tega razloga so bile izvedene 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. Ta na podlagi programskega paketa DEWESsoft omogoča neposredno harmonsko analizo z uporabo hitre Fourierove transformacije (FFT), ki je v modulu DEWESsoft Power [37]. V merilni instrument sta bili na podlagi matematičnega modula v programskem okolju DEWESsoft implementirani dve metodi, in sicer metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami in metoda po IEC 61000-3-6. Rezultati metode harmonskih vektorjev z dejanskimi (ocenjenimi) impedancami so bilo pridobljeni s poznejšim izračunom v programskem paketu MATLAB. Za analizo je bila izbrana 5. harmonska komponenta, ki je zaradi narave bremen (na primer računalnikov in razsvetljave) v električnem omrežju fakultete najbolj zastopana. Ker se harmonsko popačenje v posameznih fazah ne razlikuje preveč, je obravnavano harmonsko popačenje oziroma 5. harmonska komponenta samo v fazi L1. Stran v programskem okolju DEWESsoft, na podlagi katere je mogoče neposredno odčitati odgovornost za harmonsko popačenje, je prikazana na sliki 4.6.



Slika 4.6: Določanje odgovornosti za harmonsko popačenje v programskem okolju DEWESoft

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 [38] 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.

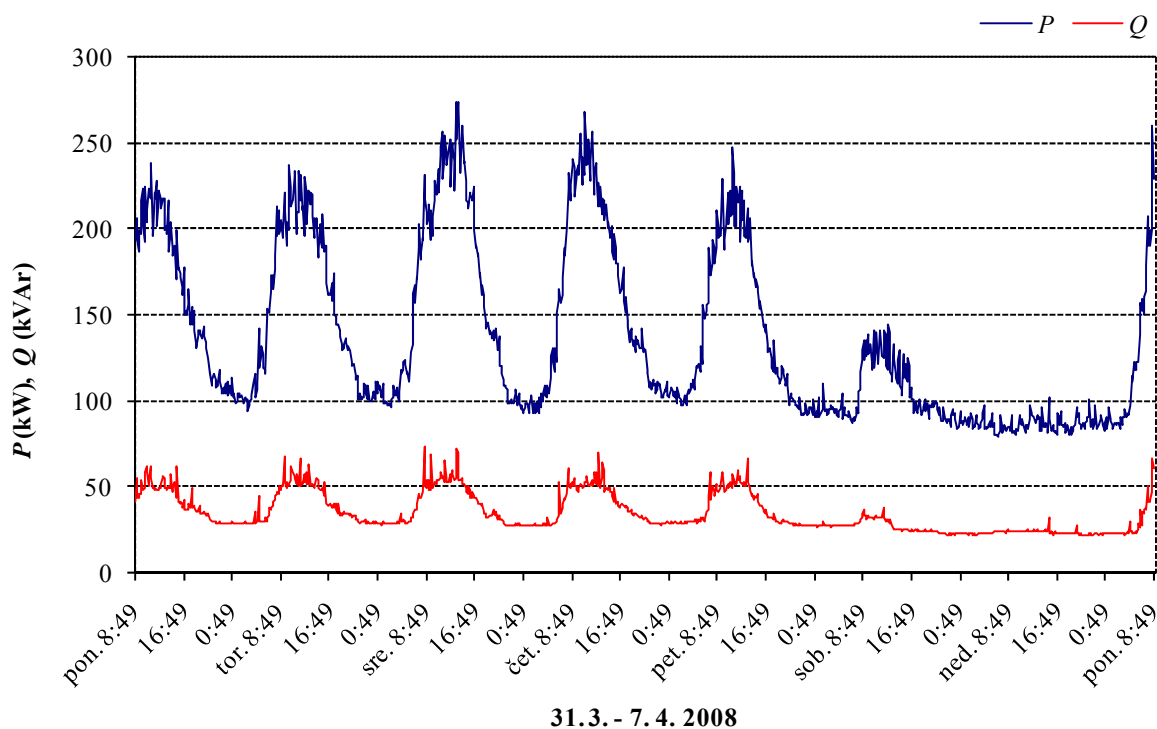
Harmonski spekter (do 21. reda) ter potek toka in napetosti faze L1, izmerjene v TP Stara, je prikazan na sliki 4.7. Podane so relativne vrednosti posamezne harmonske komponente toka in napetosti, izražene v odstotkih.



Slika 4.7: Harmonski spekter in potek toka in napetosti faze L1 izmerjene v TP Stara

Za ustrezen grafični prikaz harmonskega popačenja in pripadajoče odgovornosti za celotno obdobje merjenja (en teden) je bila med posameznimi desetminutnimi intervali uporabljena linearna interpolacija.

Tedenski obremenitveni diagram, izmerjen v TP Stara, je podan na sliki 4.8.

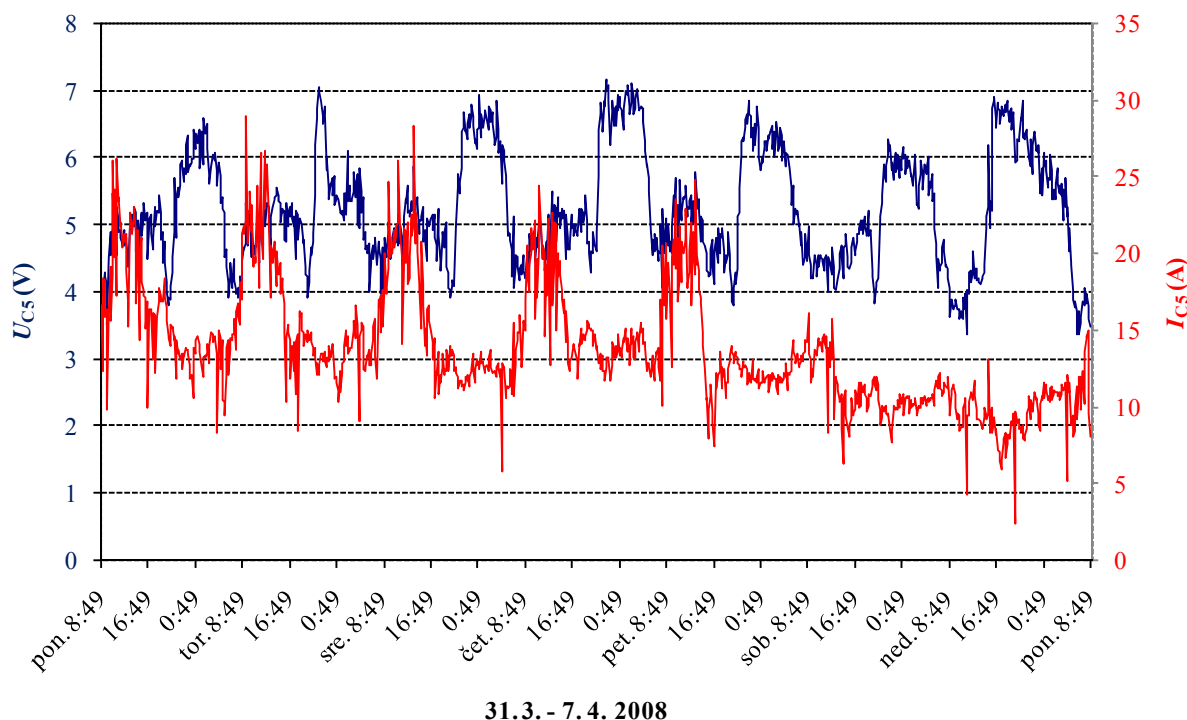


Slika 4.8: Obremenitveni diagram – TP Stara na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani

Obremenitveni diagram kaže delovni dan na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer obremenitev narašča od šeste do devete ure zjutraj, ko se začne delovni dan, in začne upadati po tretji uri popoldan. Ker sobota in nedelja na fakulteti nista delovna dneva, je temu primerna tudi nizka obremenitev. Faktor moči se v celotnem merilnem obdobju giblje med vrednostma 0,95 in 0,99.

Na sliki 4.7 je prikazan spekter harmonskega popačenja napetosti in toka, izmerjenega v TP Stara, ki sestoji predvsem iz lihih harmonskih komponent, pri čimer je najbolj zastopana 5. harmonska komponenta. V toku so sicer prisotne tudi razmeroma visoke vrednosti 3. harmonskih komponent, ki tvorijo nični sistem, vendar se zaradi vezave transformatorja trikot/zvezda ne širijo v omrežje oziroma se v manjšem obsegu odražajo v 3. harmonskih komponentah napetosti. Na podlagi analize meritev v omrežju Fakultete za elektrotehniko univerze v Ljubljani ni bilo opaziti kakršnihkoli ojačenj harmonikov, ki bi bile posledica resonančnih stanj.

Kot je bilo že omenjeno, je bila za analizo uporabljena 5. harmonska komponenta, ki je v omrežju fakultete najbolj zastopana. Grafični prikaz izmerjene efektivne 5. harmonske komponente napetosti in toka na PM za celotno merilno obdobje je na sliki 4.9.



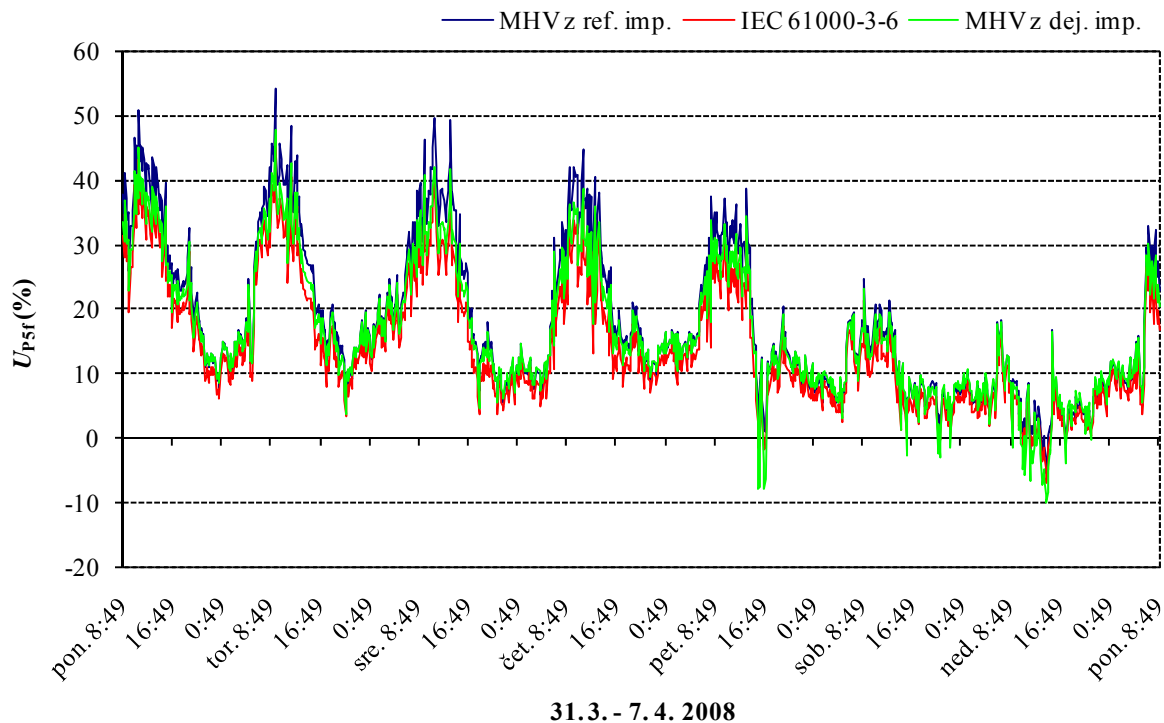
Slika 4.9: 5. harmonska komponenta napetosti in toka izmerjena v TP Stara

5. harmonska komponenta napetosti je med delovnim dnem 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, ki je v tem času zaprta, 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, ki sta na fakulteti dela prosta dneva, zato je spremembe napetostnega popačenja 5. reda mogoče pripisati predvsem dobavitelju oziroma omrežju.

#### 4.2.1 Harmonsko popačenje napetosti

Odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti, izračunana po metodi harmonskih vektorjev z referenčnimi in dejanskimi ocenjenimi impedancami, ter po metodi

po IEC 61000-3-6, je prikazana na sliki 4.10. Navedene so vrednosti v odstotkih, izračunane glede na absolutno vrednost izmerjene 5. harmonske komponente napetosti v TP Stara ( $|\underline{U}_{C5}|$ ). Absolutna vrednost izmerjene napetosti na PM ( $|\underline{U}_{C5}|$ ) je enaka efektivni vrednosti napetosti ( $U_{C5}$ ).



31. 3. - 7. 4. 2008

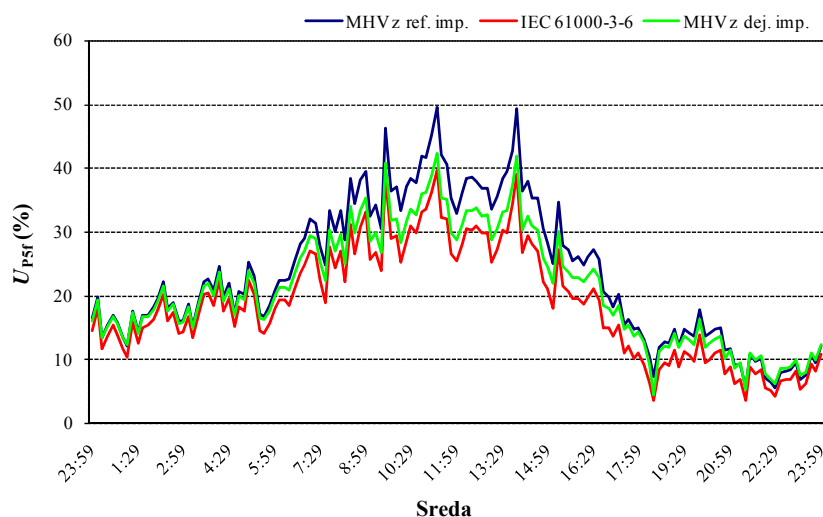
Slika 4.10: Odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti na PM (TP Stara)

Vse tri metode za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje dajejo zelo podobne rezultate, kar je razvidno tudi s slike 4.10. Povečana odgovornost porabnika se kaže predvsem med tednom med delovnimi urami, ko se zaradi narave bremen na fakulteti poveča tudi 5. harmonska komponenta toka. Podrobneje je na slikah 4.11 in 4.12 prikazan en delovni dan (sreda), kjer so prikazani izmerjena 5. harmonska komponenta napetosti in prispevki porabnika, izračunani po treh obravnavanih metodah. Prispevki porabnika k 5. harmonski komponenti napetosti so navedeni v odstotkih, izračunanih glede na absolutno vrednost izmerjene 5. harmonske komponente napetosti v TP Stara ( $|\underline{U}_{C5}|$ ). Odgovornost omrežja ni podana in jo je mogoče preprosto določiti kot razliko  $100\% - U_{P5F}(\%)$  (100 % predstavlja absolutno vrednost izmerjene napetosti na PM  $|\underline{U}_{C5}|$ ).





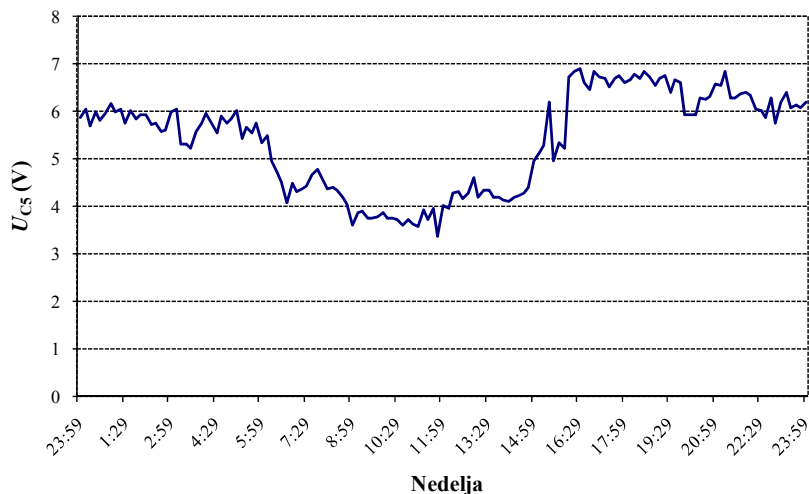
Slika 4.11: 5. harmonska komponenta napetosti na PM (TP Stara) za značilen delovni dan (sredo)



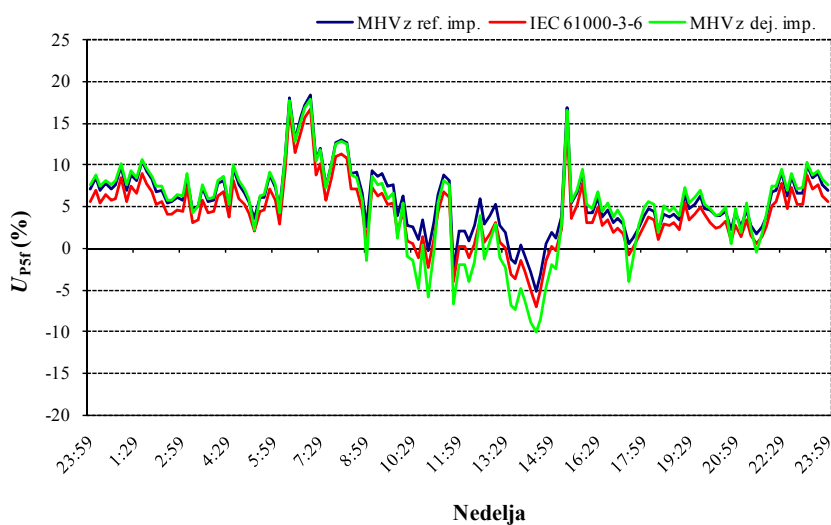
Slika 4.12: Odgovornost porabnika za napetostno popačenje 5. reda za značilen delovni dan (sredo)

Primerjava rezultatov metod kaže, da metode dajejo zelo podobne rezultate. Med največjo obremenitvijo (med osmo in petnajsto uro) je do porabnika najrestriktivnejša metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami, ki pokaže do 50 odstotno odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento napetosti na PM. 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.

Rezultati izmerjene 5. harmonske komponente napetosti na PM ter prispevki porabnika za dela prost dan so prikazani na slikah 4.13 in 4.14. Prispevki porabnika k 5. harmonski komponenti napetosti so navedeni v odstotkih, izračunanih glede na absolutno vrednost izmerjene 5. harmonske komponente napetosti v TP Stara ( $|U_{C5}|$ ).



Slika 4.13: 5. harmonska komponenta napetosti na PM (TP Stara) za dela prost dan (nedeljo)

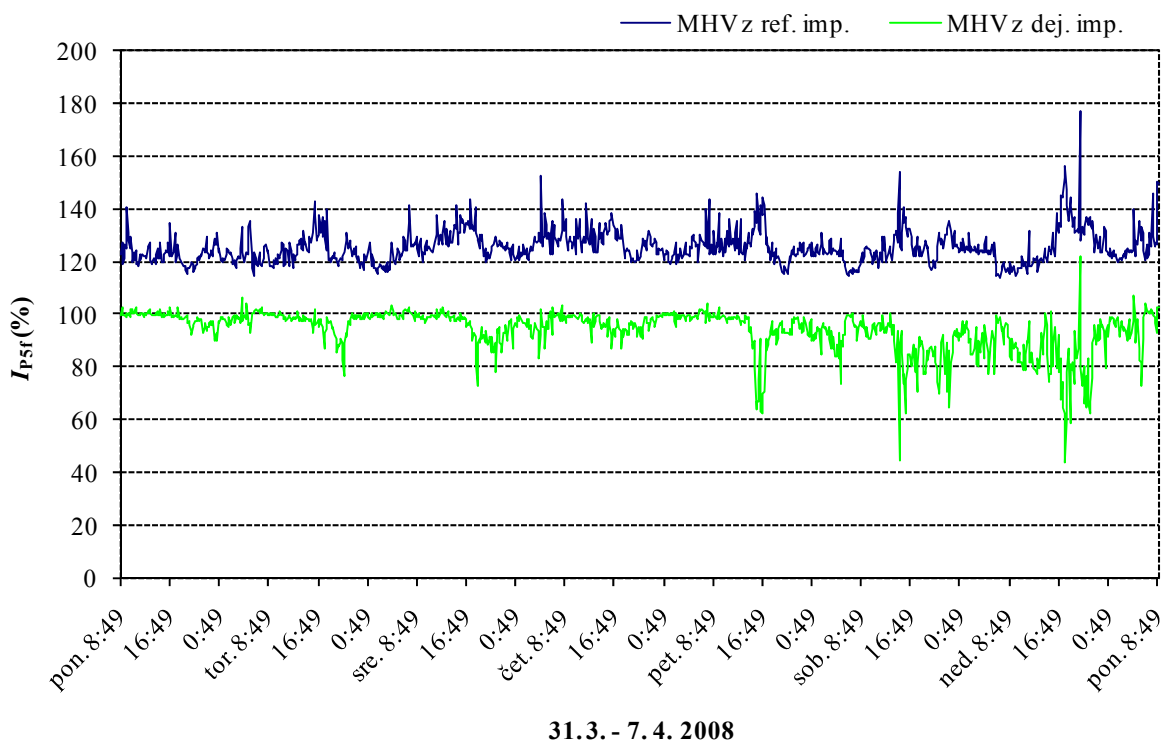


Slika 4.14: Odgovornost porabnika za napetostno popačenje 5. reda za dela prost dan (nedeljo)

Vse tri metode prikazujejo majhne prispevke porabnika k 5. harmonski komponenti napetosti, ki v določenem obdobju postanejo celo negativni, kar pomeni, da porabnik kompenzira 5. harmonsko komponento napetosti na PM. Rezultati so smiselni, če upoštevamo, da je fakulteta v nedeljo zaprta, in je obremenitev manjša.

## 4.2.2 Harmonsko popačenje toka

Pri določanju prispevkov oziroma odgovornosti za harmonsko popačenje toka sta primerjani metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami in metoda harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami. Metoda po IEC 61000-3-6 temelji na primerjanju razmer pred priključitvijo porabnika in po njej, zato neposredno določanje odgovornosti za tokovno popačenje ni mogoče. V tem primeru je mogoče razliko med tokovnimi razmerami pred priključitvijo bremena in po njej določiti na podlagi stikalnih manevrov bremena oziroma dodatnih elementov [26]. Potek toka, izmerjenega v TP Stara, je prikazan na sliki 4.9, na sliki 4.15 pa so ponazorjeni prispevki oziroma odgovornost porabnika za 5. harmonsko komponento toka v TP Stara. Prispevki porabnika k 5. harmonski komponenti toka so izraženi v odstotkih, izračunanih glede na absolutno vrednost izmerjene 5. harmonske komponente toka v TP Stara ( $I_{C5}$ ). Odgovornost omrežja ni podana in jo je mogoče preprosto določiti kot razliko  $I_{P5f}$  (%) do sto odstotkov, kar predstavlja  $|I_{C5}|$ .



Slika 4.15: Odgovornost porabnika za tokovno popačenje 5. reda na PM (TP Stara)

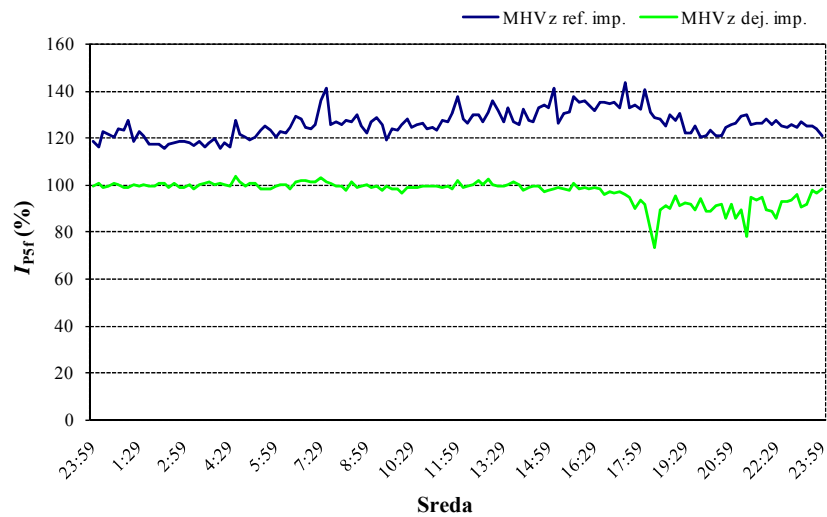
Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami izkazuje polno odgovornost porabnika za tokovno harmonsko popačenje 5. reda, pri čimer omrežje tokovni harmonik celo nekoliko kompenzira (negativni prispevek omrežja). Rezultati metode harmonskih vektorjev,

kjer so upoštevane dejanske (ocenjene) impedance, večinoma prav tako izkazuje skoraj polno odgovornost porabnika za tokovno popačenje 5. reda, vendar je do porabnika nekoliko manj restriktivna in v določenem obdobju del odgovornosti prenese tudi na stran omrežja. Na sliki 4.16 je prikazana izmerjena 5. harmonska komponenta toka za delovni dan (sredo). S slike je razvidno povečanje toka 5. reda med osmo in šestnajsto uro, ko na fakulteti potekajo dejavnosti delovnega dne.



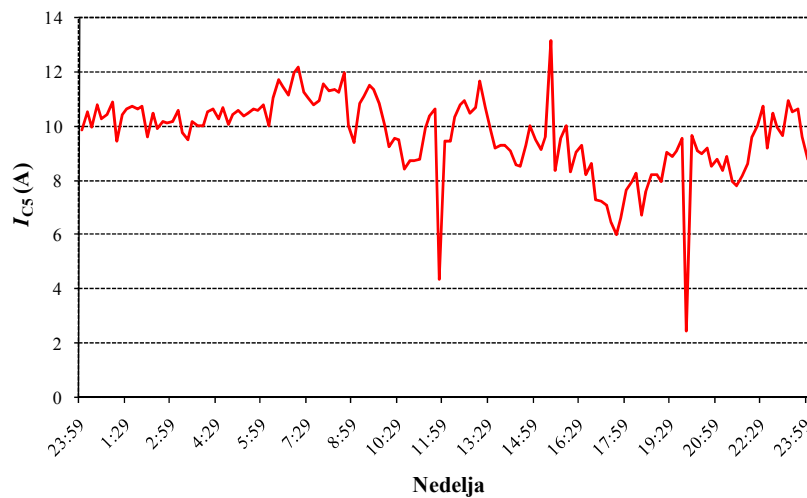
Slika 4.16: 5. harmonska komponenta toka na PM (TP Stara) za delovni dan (sredo)

Tokovno harmonsko popačenje 5. reda ostane na razmeroma visoki ravni tudi po končanem delovnem dnevu, kar je mogoče pripisati predvsem dejstvu, da veliko bremen (na primer računalnikov) ostane vključenih tudi po končanem delovniku. Odgovornost za tokovno harmonsko popačenje 5. reda je prikazana na sliki 4.17. Obe metodi dajeta podobne rezultate, pri čimer je metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami restriktivnejša do porabnika. Porabnik je v tem primeru praktično v celoti odgovoren za tokovno harmonsko popačenje 5. reda. Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami daje negativni prispevek omrežja, kar pomeni, da omrežna stran zmanjšuje 5. tokovni harmonik na PM.

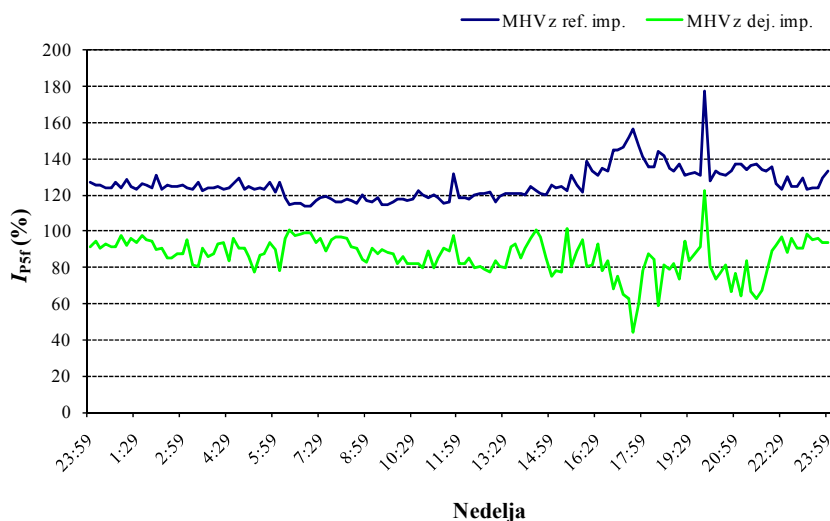


Slika 4.17: Odgovornost porabnika za tokovno popačenje 5. reda v TP Stara na delovni dan (sredo)

Podobno lahko ugotovimo za prosti dan na fakulteti (primer nedelje na slikah 4.18 in 4.19), kjer ostaja tokovni harmonik 5. reda na nižji ravni kot med delovnimi dnevi.



Slika 4.18: 5. harmonska komponenta toka na PM (TP Stara) za dela prost dan (nedeljo)



Slika 4.19: Odgovornost porabnika za tokovno popačenje 5. reda v TP Stara na dela prost dan (nedeljo)

Vrednosti 5. harmonske komponente toka v nedeljo so podobne vrednostim 5. harmonika po končanem delovnem času med tednom. To nakazuje, da tudi ob koncu tedna razmeroma veliko bremen na fakulteti ostane vključenih. Za tokovno popačenje 5. reda je tudi v tem primeru večinoma odgovoren porabnik. Metoda harmonskih vektorjev z dejanskimi (ocenjenimi) impedancami majhen del odgovornosti pripiše tudi omrežni strani, medtem ko je metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami restriktivnejša do porabnika in podaja njegovo polno odgovornost za 5. harmonsko komponento toka. Odgovornost porabnika je večja od sto odstotkov, kar nakazuje, da omrežje nekoliko zmanjšuje tokovni harmonik 5. reda v TP Stara.

Kot je bilo že omenjeno, porabnik ne more biti odgovoren za spremembo harmonskega popačenja (povečanje ali zmanjšanje), če je ta posledica sprememb v napajalnem omrežju. Čeprav vse tri metode dajejo smiselne rezultate, je bilo v prejšnjih poglavjih nakazano, da je metoda harmonskih vektorjev z uporabo referenčnih impedanc najrobustnejša in manj občutljiva za spremembe razmer v omrežju oziroma morebitne resonančne razmere. Implementacija metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami v merilni instrument je pokazala, da je mogoče neposredno določanje odgovornosti za tokovno in napetostno harmonsko popačenje. Metodo po IEC 61000-3-6 je prav tako mogoče uporabiti za neposredno merjenje odgovornosti za napetostno harmonsko popačenje, vendar lahko, kot je bilo nakazano v prejšnjih poglavjih, v primeru sprememb na strani omrežja vodi do

napačnih zaključkov, poleg tega pa je določanje odgovornosti za tokovno harmonsko popačenje pogojeno s stikalnimi manevri ali z uporabo dodatnih elementov.

Odgovornost za tokovno in napetostno harmonsko popačenje je mogoče določiti tudi na podlagi metode harmonskih vektorjev, kjer uporabimo dejanske oziroma ocenjene impedance. Slabost tovrstnega pristopa je v nepoznavanju oziroma v nepravilni oceni impedanc, kar je v praksi precej pogost problem in lahko vodi do napačnih rezultatov. Metoda harmonskih vektorjev z dejanskimi impedancami zato ni najprimernejša za uporabo v praksi, poleg tega pa v primeru resonančnih stanj ne pripiše odgovornosti za nastale razmere strani, ki je resonančno stanje povzročila.





## SKLEPNE UGOTOVITVE

V okviru tehnološkega napredka postaja kakovost električne energije vse pomembnejši dejavnik, ki ga porabniki pogosto jemljejo kot samoumevnega, vendar se je v praksi izkazalo, da problem zagotavljanja ustrezne kakovosti električne energije ni zanemarljiv. Eden izmed parametrov, ki opredeljujejo kakovost električne energije, je tudi harmonsko popačenje. Medtem ko na eni strani narašča uporaba naprav, ki so vir harmonskega popačenja, so na drugi strani sodobni tehnološki procesi precej občutljivi na harmonsko popačenje oziroma slabo kakovost električne energije.

Prispevek doktorske naloge je predvsem v reševanju problematike določanja odgovornosti za harmonsko popačenje. Ugotavljanje odgovornosti za harmonsko popačenje lahko prispeva k zmanjšanju harmonskega popačenja v omrežju, saj je mogoče bremena oziroma porabnike na ta način ustrezno sankcionirati oziroma jih spodbuditi k vlaganju v izboljšanje kakovosti električne energije. Čeprav je problematika harmonskega popačenja znana že kar nekaj desetletij, širše uporabe metod za določanje odgovornosti še ni. Večina metod, ki so navedene v literaturi, je preveč kompleksnih oziroma so neprimerne za praktično uporabo, ker zahtevajo podatke, ki so v praksi redko dostopni. Iz navedenih razlogov je bil cilj doktorske naloge določiti preprost način ugotavljanja odgovornosti za harmonsko popačenje posameznega porabnika oziroma omrežja in pri tem uporabiti zgolj meritve v eni točki oziroma v točki priključitve porabnika v omrežje.

Uporabljena je metoda harmonskih vektorjev, ki temelji na Nortonovem oziroma Theveninovem ekvivalentnem tokokrogu, kjer sta porabnik in omrežje prikazana s tokovnim oziroma z napetostnim harmonskim virom in pripadajočo impedanco. Ker je poznavanje dejanskih impedanc v praksi pogosto zelo težavno, je v doktorski nalogi predlagana uporaba referenčnih impedanc. Pri tem je vsako odstopanje dejanske impedance od referenčne vrednosti pretvorjeno v ekvivalentni harmonski vir. Določanje referenčnih impedanc temelji na že uveljavljenih načelih zagotavljanja ustreznega faktorja moči, kjer je želeni ohmski karakter porabnikov ( $\cos\varphi = 1$ ) pri osnovni frekvenci (50 Hz). V doktorski nalogi je predlagana razširitev omenjenih zahtev na vse harmonske frekvence, kar pomeni, da je želeni ohmski karakter porabnika ne samo pri osnovni frekvenci, ampak tudi pri vseh harmonskih frekvencah. V skladu s tem je za referenčno impedanco porabnika predlagana ohmska

---

komponenta porabniškega bremena, medtem ko je na strani omrežja predlagana referenčna impedanca določena kot vsota impedance napajalnega transformatorja in kratkostične impedance omrežja.

Preizkus metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami je bil izveden na preprostem modelu omrežja v programskem okolju MATLAB, kjer so bili obravnavani referenčni primeri. Rezultati različnih primerov so pokazali, da metoda omogoča smiselno ovrednotenje odgovornosti za harmonsko popačenje. Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami pravilno ovrednoti odgovornost v primeru prisotnosti harmonskih virov samo na strani porabnika ali omrežja in prisotnosti virov na obeh straneh, kar je v praksi najpogostejši primer. Poleg tega metoda pravilno ovrednoti odgovornost tudi v primeru sprememb na strani omrežja ali porabnika ter pri tem upošteva tudi morebitna resonančna stanja. Problematika resonančnih razmer je v primeru harmonskega popačenja zelo pereča, saj lahko zaradi resonance prihaja do ojačenj harmonskega popačenja toka ali napetosti.

Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami ima v primerjavi z drugimi metodami, ki so omenjene in opisane v doktorski nalogi, veliko praktičnih prednosti. Zaradi preprostosti določanja referenčnih impedanc porabnika samo na podlagi meritev na mestu priključitve porabnika v omrežje ni potrebno poznavanje dejanskih impedanc in impedančnih frekvenčnih karakteristik, ki so v praksi pogosto nedostopne in jih zahteva osnovna metoda harmonskih vektorjev. Poleg tega metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami pri ugotavljanju odgovornosti ne zahteva kakršnih koli stikalnih manevrov bremen ali uporabo dodatnih elementov. V primerjavi z osnovno metodo harmonskih vektorjev, kjer so uporabljene dejanske impedance, metoda z referenčnimi impedancami omogoča smiselno ovrednotenje odgovornosti za harmonsko popačenje v primeru resonančnih stanj. Postopek določanja emisij harmonskega popačenja oziroma odgovornosti porabnika, kot je določen v IEC 61000-3-6, je sicer preprost, saj ne zahteva poznavanja faznega kota harmonskega toka oziroma napetosti in impedanc na strani porabnika, vendar se odgovornost ugotavlja zgolj na podlagi amplitude posamezne harmonske komponente, ki jo povzroča porabnik. Pri harmonskem popačenju ima pomembno vlogo fazni kot, saj lahko porabnik v točki priključitve v omrežje poveča ali zmanjša posamezno harmonsko komponento. Na podlagi tega je v doktorski nalogi predlagan podoben postopek določanja dejanske odgovornosti porabnika kot v primeru metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami. Kljub temu primerjava metod pokaže, da rezultati metode po IEC 61000-3-6 lahko vodijo k

---

nezanesljivim rezultatom, predvsem v primeru sprememb impedance na strani omrežja. Metoda po IEC 61000-3-6 v tem primeru nakazuje spremembo odgovornosti porabnika, čeprav porabnik ne more biti odgovoren in nima vpliva na spremembo omrežne impedance.

Uporabnost metode harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami je nakazana z implementacijo metode v merilni instrument. Izvedene so bile meritve harmonskega popačenja v transformatorski postaji na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Implementacija metode v merilni instrument omogoča spremljanje odgovornosti za harmonsko popačenje v realnem času. Izvedene so bile tedenske meritve, na podlagi katerih so bile primerjane različne metode (metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi in dejanskimi impedancami ter metoda po IEC 61000-3-6) za določanje odgovornosti za harmonsko popačenje. Primerjava je pokazala podobnost rezultatov posameznih metod, pri čimer je metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami v večini primerov najbolj omejevalna za porabnika. Kljub vsemu ima metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami prednost zaradi preprostosti, poleg tega pa je precej robustnejša in manj občutljiva na različne spremembe, ki se dogajajo tako na strani omrežja kot na strani porabnika. Ker metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami zahteva podatek o faznem kotu med harmonskim tokom in napetostjo, ki je v splošnem problematičen zaradi natančnosti meritve, bo treba v nadaljevanju raziskovalnega dela posebno pozornost nameniti tudi občutljivosti metode na napako meritve faznega kota.

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. V primeru resonančnih razmer je lahko metoda za določanje odgovornosti pokazatelj neustreznih razmer, ki jih mora povzročitelj ustrezno popraviti. Finančno ovrednotenje prispevkov k harmonskemu popačenju je eden izmed načinov, ki bi porabnike oziroma dobavitelje spodbudilo k reševanju morebitnih problemov s harmonskim popačenjem. Vsekakor je treba pri tovrstnem načinu reševanja problematike harmonskega popačenja prvotno pravilno in pravično določiti deleže odgovornosti.

Metoda harmonskih vektorjev z referenčnimi impedancami, ki je bila razvita v okviru doktorske naloge, se je izkazala kot tista, s katero je mogoče dobro in pravično oceniti odgovornost za harmonsko popačenje v točki priključitve porabnika v omrežje. Metodo je zaradi preprostosti mogoče uporabiti v merilnih instrumentih s čimer je izpolnjen pogoj tudi za njeno praktično uporabo.

---

**LITERATURA**

- [1] Dugan, C. R., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W., "Electrical Power System Quality," McGraw-Hill, 2002.
- [2] Acha, E., Madrigal, M., "Power systems harmonics: Computer Modeling and Analysis," John Wiley and Sons, Ltd, 2001.
- [3] Arrillaga, J., Smith, B. C., Watson, N. R., Wood, A. R., "Power System Harmonic Analysis," John Wiley and Sons, Ltd, New York, 1998.
- [4] Arseneau, R., "Harmonic Cost Allocation with Existing and Proposed Revenue Metering Methods," IEEE PES Summer Meeting 1999: Harmonic Measurement and Cost Allocation, 1999.
- [5] Bergeron, R., Slimani, K., "A Method for the Determination of the Customer Share of the Contribution to the Level of Harmonic Voltage on an Electric Network," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol.1, pp. 354-360, 1999.
- [6] McEachern, A., Grady, W. M., Moncrief, W. A., Heydt, G. T., McGranaghan, M., "Revenue and Harmonics: An Evaluation of Some Proposed Rate Structures," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, pp. 474-482, 1995.
- [7] Electromagnetic compatibility (EMC), IEC standard 61000-3-4, 1996.
- [8] Značilnosti napetosti v javnih distribucijskih omrežjih, Slovenski standard SIST EN 50160, druga verzija, 2001.
- [9] IEEE PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation," IEEE IAS Harmonic Working Group, 1999.
- [10] Task force on Harmonics Modeling and Simulation, "The modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part I : Concepts, models and simulation techniques," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, pp. 452–465, 1996.
- [11] Task force on Harmonics Modeling and Simulation, "The modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part II : Sample systems and Examples," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, pp. 466–474, 1996.

- 
- [12] Ferjančič, D., "Delež harmonskega popačenja na porabniški in napajalni strani električnega omrežja," magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2002.
- [13] Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication. Technical Report IEC 61000-3-6, first edition, 1996.
- [14] Electromagnetic compatibility (EMC), IEC standard 61000-3-2, 1997.
- [15] Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 6: Assessment of harmonic emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems - Draft Technical Report. Draft Technical Report IEC 61000-3-6, Ed. 2, 2007.
- [16] Xu, W., Liu, Y., "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications," IEEE PES Summer Meeting 1999: Harmonic Measurement and Allocation, 1999.
- [17] Emanuel, A. E., "Harmonic cost allocation: A difficult task," IEEE PES Summer Meeting 1999: Harmonic Measurement and Cost Allocation, 1999.
- [18] Davis, E. J., Emanuel, A. E., Pileggi, D. J., "Harmonic pollution metering: theoretical considerations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, No. 1, pp. 19–23, 2000.
- [19] Cristaldi, L., Ferrero, A., Salicone, S., "A distributed system for electric power quality measurement," IEEE Trans. Instr. Meas., vol. 51, No. 4, pp. 776–781, 2002.
- [20] Castaldo, D., Ferrero, A., Salicone, S., Testa, A., "A power-quality index based on multi-point measurements," Proc. of Power Tech 2003, Bologna, Italy, 2003.
- [21] Locci, N., Muscas, C., Sulis, S., "Multi-Point Measurement Techniques or Harmonic Pollution Monitoring: a Comparative Analysis," L'Energia Elettrica, Vol. 81, 2004.
- [22] Bergeron, R., Slimani, K., "Method for an Equitable Allocation of the Cost of Harmonics in an Electrical Network," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 347–353, 1999.
- [23] Swart, P. H., Case, M. J., Van Wyk, J. D., "On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks," Eur. Trans. Elect. Power Eng., vol. 6, No. 6, 1996.

- 
- [24] Cristaldi, L., Ferrero, A., “Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, pp. 683–685, 1995.
- [25] Xu, W., Liu, X., Liu, Y., “An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, pp. 214–219, 2003.
- [26] “Review of methods for measurement and evaluation of harmonic emission level from an individual distorting load,” in *CIGRE, CIGRE 36.05/ CIRED 2 Joint WG CC02 (Voltage Quality)*, 1999.
- [27] Tsukamoto, M., Kouda, I., Natsuda, Y., Minowa, Y., Nishimura, S., “Advanced method to identify harmonic characteristic between utility grid and harmonic current sources,” in *Proc. 8th Int. Conf. Harmonics Quality Power*, Athens, Greece, pp. 419–425, 1998.
- [28] Oliveira, A., Oliveira, J. C., Resende, J. W., Miskulin, M. S., “Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 1721–1726, 1991.
- [29] Yang, H., Pirotte, P., Robert, A., “Assessing the harmonic emission level from one particular customer,” in *Proc. 3rd Int. Conf. Power Quality: End-Use Applicat. Perspectives*, Amsterdam, Netherlands, 1994.
- [30] Thunberg, E., Soder, L., “A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, pp. 272–277, 1999.
- [31] Xu, W., Liu, Y., “A method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the point of Common Coupling,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, pp. 804–811, 2000.
- [32] Li, C., Xu, W., Tayjasanant, T., “A Critical Impedance Based Method for Identifying Harmonic Sources,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, 2004.
- [33] Harley, R., Lambert, F., Mazumdar, J., “System and method for determining harmonic contributions from non-linear loads,” *IEEE Industry Applications Conference, 40th IAS Annual Meeting*, 2005.
- [34] Mazumdar, J., Harley, R., Lambert, F., Venayagamoorthy, G. K., Page, M. L., “Intelligent tool for determining the true harmonic current contribution of a customer in a power distribution network,” *IEEE Industry Applications Conference 41st IAS Annual Meeting*, 2006.

- [35] Li, C., Xu, W., “On Defining Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling,” IEEE Power Engineering Review, 2002.
- [36] McEachern, A., “Identifying Harmonics Sources on the Power Grid - Some Technical Challenges,” IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.
- [37] DEWESoft Power, Software user shortform and technical reference manual.
- [38] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I., “Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 23, pp. 425–433, 2008.



## **IZJAVA O AVTORSTVU DOKTORSKE DISERTACIJE**

Podpisani Tomaž Pfajfar izjavljam, da sem doktorsko disertacijo z naslovom Določanje odgovornosti za harmonsko popačenje z referenčnimi impedancami izdelal samostojno, pod mentorstvom prof. dr. Igorja Papiča, univ. dipl. inž. el.. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Tomaž Pfajfar



## PRILOGE

## Preizkus metod na modelu omrežja v programskem okolju MATLAB

```

clear
u=0.4; %napetosni nivo
h=5; %vir harmonske komponente h reda
f=50; %frekvenca
Sp=100; %breme porabnika v kVA
cosfiZp=0.95;
Zm_r=0.024; %referencna impedanca na strani omrežja
cosfiZm_r=0.196;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for j=1:1
[Zm]=0.024*ones(1,max(j));%0.01:0.01:0.06; %impedanca na strani omrežja
[Ipp]=1*ones(1,max(j));%28:1:31; %harmonski vir na strani porabnika
[Um]=2.31*ones(1,max(j)); %harmonski vir na strani omrežja
for k=1:37
[fiIp]=0:10:360;%0*ones(1,max(k));%
[fiUm]=0*ones(1,max(k));%0:10:360;%
[cosfiZm]=0.196*ones(1,max(k));%0.1:0.1:0.3;%

% IZRACUN VREDNOSTI NA PM %
%izracun harmonskih impedanc
Zp=u^2/Sp*1000; %impedanca porabnika
Zpp1=Zp*cosfiZp+i*Zp*sin(acos(cosfiZp));
Zpph=Zp*cosfiZp+i*h*Zp*sin(acos(cosfiZp));

Zm1(j,k)=Zm(j)*cosfiZm(k)+i*Zm(j)*sin(acos(cosfiZm(k)));
Zmh(j,k)=Zm(j)*cosfiZm(k)+i*h*Zm(j)*sin(acos(cosfiZm(k)));

%izmerjene vrednosti na PM
Ic1(j,k)=(u*1000/sqrt(3))/(Zm1(j,k)+Zpp1); %tok osnovne frekvence v A na PM
Ic1t(j,k)=abs(Ic1(j,k));
fiIc1(j,k)=angle(Ic1(j,k));
fiIc1_st(j,k)=angle(Ic1(j,k))*180/pi;

Uc1(j,k)=(u*1000/sqrt(3))-Ic1(j,k)*Zm1(j,k); %napetost osnovne frekvence v V na PM
Uc1t(j,k)=abs(Uc1(j,k));
fiUc1(j,k)=angle(Uc1(j,k));
fiUc1_st(j,k)=angle(Uc1(j,k))*180/pi;

fi1(j,k)=fiUc1(j,k)-fiIc1(j,k);
fi1_st(j,k)=(fiUc1(j,k)-fiIc1(j,k))*180/pi;

Umm(j,k)=Um(j)*cos(fiUm(k)*pi/180)+i*Um(j)*sin(fiUm(k)*pi/180);
Ipp(j,k)=Ipp(j)*cos(fiIp(k)*pi/180)+i*Ipp(j)*sin(fiIp(k)*pi/180);

Ich(j,k)=(Umm(j,k)-Ipp(j,k)*Zpph)/(Zmh(j,k)+Zpph); %harmonski tok na PM v A
Ich(j,k)=abs(Ich(j,k));
fiIch(j,k)=angle(Ich(j,k));
fiIch_st(j,k)=angle(Ich(j,k))*180/pi

Uch(j,k)=Umm(j,k)-Ich(j,k)*Zmh(j,k); %harmonska napetost na PM v V
Uch(j,k)=abs(Uch(j,k));
fiUch(j,k)=angle(Uch(j,k));
fiUch_st(j,k)=angle(Uch(j,k))*180/pi;

fih(j,k)=fiIch(j,k)-fiUch(j,k);
fih_st(j,k)=(fiIch(j,k)-fiUch(j,k))*180/pi;

% MHV Z REFERENCNIMI IMPEDANCAMI %
Zph(j,k)=Uc1t(j,k)/(Ic1t(j,k)*cos(fi1(j,k))); % vzporedna vezava, tokovno popacenje
Zphz(j,k)=Uc1t(j,k)*cos(fi1(j,k))/Ic1t(j,k); % zaporedna vezava, napetostno popacenje

Zmh_ref=Zm_r*cosfiZm_r+i*h*Zm_r*sin(acos(cosfiZm_r));
Zm1_ref=Zm_r*cosfiZm_r+i*Zm_r*sin(acos(cosfiZm_r)); %za 50 Hz

% tokovni harmonski vir na strani porabnika
Iph(j,k)=(Uch(j,k)/Zph(j,k))-Ich(j,k);

```

```

Ipht(j,k)=abs(Iph(j,k));

% tokovni harmonski vir na strani mreze
Imh(j,k)=Uch(j,k)/Zmh_ref+Ich(j,k);
Imht(j,k)=abs(Imh(j,k));

% tokova, ki teceta cez tocko priklopa zaradi omrezja oziroma porabnika, superpozicija
Imch(j,k)=(Zmh_ref/(Zmh_ref+Zph(j,k)))*Imh(j,k);
Ipch(j,k)=(-Zph(j,k)/(Zmh_ref+Zph(j,k)))*Iph(j,k);

% prispevek omrezja in porabnika k celotnemu harmonskemu toku Ich
Imcht(j,k)=abs(Imch(j,k));
Ipcht(j,k)=abs(Ipch(j,k));
fiImch(j,k)=angle(Imch(j,k));
fiIpch(j,k)=angle(Ipch(j,k));
Imhf(j,k)=Imcht(j,k)*cos(fiImch(j,k)-fiIch(j,k));
Iphf(j,k)=Ipcht(j,k)*cos(fiIpch(j,k)-fiIch(j,k));
fiImch(j,k)=angle(Imch(j,k))*180/pi;
fiIpch(j,k)=angle(Ipch(j,k))*180/pi;
Imhf_proc(j,k)=Imhf(j,k)*100/Icht(j,k);
Iphf_proc(j,k)=Iphf(j,k)*100/Icht(j,k);

% napetostni harmonski vir na strani omrezja
Umh(j,k)=Uch(j,k)+Ich(j,k)*Zmh_ref;
Umht(j,k)=abs(Umh(j,k));
fiUmh_st(j,k)=angle(Umh(j,k))*180/pi

% napetostni harmonski vir na strani porabnika
Uph(j,k)=Uch(j,k)-Ich(j,k)*Zphz(j,k);
Upht(j,k)=abs(Uph(j,k));
fiUph_st(j,k)=angle(Uph(j,k))*180/pi

% prispevek omrezja in porabnika k celotni harmonski napetosti
Umch(j,k)=Zphz(j,k)*Umh(j,k)/(Zmh_ref+Zphz(j,k));
Umcht(j,k)=abs(Umch(j,k));
fiUmch(j,k)=angle(Umch(j,k));
fiUmch_st(j,k)=angle(Umch(j,k))*180/pi;

Upch(j,k)=Zmh_ref*Uph(j,k)/(Zmh_ref+Zphz(j,k));
Upcht(j,k)=abs(Upch(j,k));
Upcht_proc(j,k)=(Upcht(j,k)/Ucht(j,k))*100;
fiUpch(j,k)=angle(Upch(j,k));
fiUpch_st(j,k)=angle(Upch(j,k))*180/pi;

Umhf(j,k)=Umcht(j,k)*cos(fiUmch(j,k)-fiUch(j,k));
Uphf(j,k)=Upcht(j,k)*cos(fiUpch(j,k)-fiUch(j,k));
Umhf_proc(j,k)=Umhf(j,k)*100/Ucht(j,k);
Uphf_proc(j,k)=Uphf(j,k)*100/Ucht(j,k);

% prispevki k 1. harmonski komponenti, za 50 Hz
Ip1(j,k)=(Uc1(j,k)/Zph(j,k))-Ic1(j,k);
Ip1t(j,k)=abs(Ip1(j,k));
Im1(j,k)=Uc1(j,k)/Zm1_ref+Ic1(j,k);
Im1t(j,k)=abs(Im1(j,k));
Imc1(j,k)=(Zm1_ref/(Zm1_ref+Zph(j,k)))*Im1(j,k);
Ipc1(j,k)=(-Zph(j,k)/(Zm1_ref+Zph(j,k)))*Ip1(j,k);

% prispevek omrezja in porabnika k celotnemu harmonskemu toku Ic1
Imc1t(j,k)=abs(Imc1(j,k));
Ipc1t(j,k)=abs(Ipc1(j,k));
fiImc1(j,k)=angle(Imc1(j,k));
fiIpc1(j,k)=angle(Ipc1(j,k));
Im1f(j,k)=Imc1t(j,k)*cos(fiImc1(j,k)-fiIc1(j,k));
Ip1f(j,k)=Ipc1t(j,k)*cos(fiIpc1(j,k)-fiIc1(j,k));
fiImc1(j,k)=angle(Imc1(j,k))*180/pi;
fiIpc1(j,k)=angle(Ipc1(j,k))*180/pi;
Im1f_proc(j,k)=Im1f(j,k)*100/Ic1t(j,k);
Ip1f_proc(j,k)=Ip1f(j,k)*100/Ic1t(j,k);

% prispevki harmonski napetosti v tocki merjenja zaradi omrezja oziroma porabnika
Ip1(j,k)=Uc1(j,k)/Zphz(j,k)-Ic1(j,k);
Ip1t(j,k)=abs(Ip1(j,k));
Im1(j,k)=Uc1(j,k)/Zm1_ref+Ic1(j,k);
Im1t(j,k)=abs(Im1(j,k));

Um1(j,k)=Uc1(j,k)+Ic1(j,k)*Zm1_ref;

```

```

Up1(j,k)=Uc1(j,k)-Ic1(j,k)*Zphz(j,k);

% prispevek omrezja in porabnika k celotni harmonski napetosti
Umcl(j,k)=Zphz(j,k)*Um1(j,k)/(Zm1_ref+Zphz(j,k));
Umclt(j,k)=abs(Umcl(j,k));
fiUmcl(j,k)=angle(Umcl(j,k));
fiUmcl_st(j,k)=angle(Umcl(j,k))*180/pi;

Upcl(j,k)=Zm1_ref*Up1(j,k)/(Zm1_ref+Zphz(j,k));
Upclt(j,k)=abs(Upcl(j,k));
fiUpcl(j,k)=angle(Upcl(j,k));
fiUpcl_st(j,k)=angle(Upcl(j,k))*180/pi;

Um1f(j,k)=Umclt(j,k)*cos(fiUmcl(j,k)-fiUc1(j,k));
Up1f(j,k)=Upclt(j,k)*cos(fiUpcl(j,k)-fiUc1(j,k));
Um1f_proc(j,k)=Um1f(j,k)*100/Uc1t(j,k);
Up1f_proc(j,k)=Up1f(j,k)*100/Uc1t(j,k);

% IEC 61000-3-6 %
dUmh(j,k)=Uch(j,k)+Ich(j,k)*Zmh(j,k); %vir izracunan glede na dejansko impedanco omrezja
dUmht(j,k)=abs(dUmh(j,k));
fidUmh(j,k)=angle(dUmh(j,k));
dU(j,k)=-dUmh(j,k)+Uch(j,k);
dUt(j,k)=abs(dU(j,k));
dUt_proc(j,k)=(dUt(j,k)/Ucht(j,k))*100;
fidU(j,k)=angle(dU(j,k));
fidU_st(j,k)=angle(dU(j,k))*180/pi;
R=dU(j,k)-Upch(j,k);
Uphf_iec(j,k)=dUt(j,k)*cos(fidU(j,k));
Uphf_proc_iec(j,k)=Uphf_iec(j,k)*100/Ucht(j,k);
Umhf_iec(j,k)=dUmht(j,k)*cos(fidUmh(j,k));
Umhf_proc_iec(j,k)=Umhf_iec(j,k)*100/Ucht(j,k);

% MHV Z DEJANSKIMI IMPEDANCAMI %
Zph_xu(j,k)=Zpph;
Zp1_xu(j,k)=Zpp1;

Zmh_xu(j,k)=Zmh(j,k);
Zm1_xu(j,k)=Zm1(j,k); %za 50 Hz

% tokovni harmonski vir na strani porabnika
Iph_xu(j,k)=(Uch(j,k)/Zph_xu(j,k))-Ich(j,k);
Iphf_xu(j,k)=abs(Iph_xu(j,k));

% tokovni harmonski vir na strani mreze
Imh_xu(j,k)=Uch(j,k)/Zmh_xu(j,k)+Ich(j,k);
Imht_xu(j,k)=abs(Imh_xu(j,k));

% tokova, ki teceta cez tocko priklopa zaradi omrezja oziroma porabnika, superpozicija
Imch_xu(j,k)=(Zmh_xu(j,k)/(Zmh_xu(j,k)+Zph_xu(j,k)))*Imh_xu(j,k);
Ipch_xu(j,k)=(-Zph_xu(j,k)/(Zmh_xu(j,k)+Zph_xu(j,k)))*Iph_xu(j,k);

% prispevek omrezja in porabnika k celotnemu harmonskemu toku Ich
Imcht_xu(j,k)=abs(Imch_xu(j,k));
Ipchf_xu(j,k)=abs(Ipch_xu(j,k));
fiImch_xu(j,k)=angle(Imch_xu(j,k));
fiIpch_xu(j,k)=angle(Ipch_xu(j,k));
Imhf_xu(j,k)=Imcht_xu(j,k)*cos(fiImch_xu(j,k)-fiIch(j,k));
Iphf_xu(j,k)=Ipchf_xu(j,k)*cos(fiIpch_xu(j,k)-fiIch(j,k));
fiImch_xu(j,k)=angle(Imch_xu(j,k))*180/pi;
fiIpch_xu(j,k)=angle(Ipch_xu(j,k))*180/pi;
Imhf_proc_xu(j,k)=Imhf_xu(j,k)*100/Ichf(j,k);
Iphf_proc_xu(j,k)=Iphf_xu(j,k)*100/Ichf(j,k);

% harmonska napetostna vira na strani omrezja in porabnika
Umh_xu(j,k)=Uch(j,k)+Ich(j,k)*Zmh_xu(j,k);
Uph_xu(j,k)=Uch(j,k)-Ich(j,k)*Zph_xu(j,k);

% prispevek omrezja in porabnika k celotni harmonski napetosti
Umch_xu(j,k)=Zph_xu(j,k)*Umh_xu(j,k)/(Zmh_xu(j,k)+Zph_xu(j,k));
Umcht_xu(j,k)=abs(Umch_xu(j,k));
fiUmch_xu(j,k)=angle(Umch_xu(j,k));
fiUmch_st_xu(j,k)=angle(Umch_xu(j,k))*180/pi;

Upch_xu(j,k)=Zmh_xu(j,k)*Uph_xu(j,k)/(Zmh_xu(j,k)+Zph_xu(j,k));
Upchf_xu(j,k)=abs(Upch_xu(j,k))

```

```

fiUpch_xu(j,k)=angle(Upch_xu(j,k));
fiUpch_st_xu(j,k)=angle(Upch_xu(j,k))*180/pi;

Umhf_xu(j,k)=Umcht_xu(j,k)*cos(fiUmch_xu(j,k)-fiUch(j,k));
Uphf_xu(j,k)=Upcht_xu(j,k)*cos(fiUpch_xu(j,k)-fiUch(j,k));
Umhf_proc_xu(j,k)=Umhf_xu(j,k)*100/Ucht(j,k);
Uphf_proc_xu(j,k)=Uphf_xu(j,k)*100/Ucht(j,k);

% prispevki k 1. harmonski komponenti, za 50 Hz
Ip1_xu(j,k)=(Uc1(j,k)/Zp1_xu(j,k))-Ic1(j,k);
Ip1t_xu(j,k)=abs(Ip1_xu(j,k));
Im1_xu(j,k)=Uc1(j,k)/Zm1_xu(j,k)+Ic1(j,k);
Im1t_xu(j,k)=abs(Im1_xu(j,k));
Imc1_xu(j,k)=(Zm1_xu(j,k)/(Zm1_xu(j,k)+Zp1_xu(j,k)))*Im1_xu(j,k);
Ip1_xu(j,k)=(-Zp1_xu(j,k)/(Zm1_xu(j,k)+Zp1_xu(j,k)))*Ip1_xu(j,k);

% prispevek omrežja in porabnika k celotnemu harmonskemu toku Ic1
Imc1t_xu(j,k)=abs(Imc1_xu(j,k));
Ipc1t_xu(j,k)=abs(Ipc1_xu(j,k));
fiImc1_xu(j,k)=angle(Imc1_xu(j,k));
fiIpc1_xu(j,k)=angle(Ipc1_xu(j,k));
Im1f_xu(j,k)=Imc1t_xu(j,k)*cos(fiImc1_xu(j,k)-fiIc1(j,k));
Ip1f_xu(j,k)=Ipc1t_xu(j,k)*cos(fiIpc1_xu(j,k)-fiIc1(j,k));
fiImc1_xu(j,k)=angle(Imc1_xu(j,k))*180/pi;
fiIpc1_xu(j,k)=angle(Ipc1_xu(j,k))*180/pi;
Im1f_proc_xu(j,k)=Im1f_xu(j,k)*100/Ic1t(j,k);
Ip1f_proc_xu(j,k)=Ip1f_xu(j,k)*100/Ic1t(j,k);

% prispevki harmonski napetosti v točki merjenja zaradi omrežja oziroma porabnika
Um1_xu(j,k)=Uc1(j,k)+Ic1(j,k)*Zm1_xu(j,k);
Up1_xu(j,k)=Uc1(j,k)-Ic1(j,k)*Zp1_xu(j,k);

% prispevek omrežja in porabnika k celotni harmonski napetosti
Umcl_xu(j,k)=Zp1_xu(j,k)*Um1(j,k)/(Zm1_xu(j,k)+Zp1_xu(j,k));
Umclt_xu(j,k)=abs(Umcl_xu(j,k));
fiUmcl_xu(j,k)=angle(Umcl_xu(j,k));
fiUmcl_st_xu(j,k)=angle(Umcl_xu(j,k))*180/pi;

Upcl_xu(j,k)=Zm1_xu(j,k)*Up1(j,k)/(Zm1_xu(j,k)+Zp1_xu(j,k));
Upclt_xu(j,k)=abs(Upcl_xu(j,k));
fiUpcl_xu(j,k)=angle(Upcl_xu(j,k));
fiUpcl_st_xu(j,k)=angle(Upcl_xu(j,k))*180/pi;

Um1f_xu(j,k)=Umclt_xu(j,k)*cos(fiUmcl_xu(j,k)-fiUc1(j,k));
Up1f_xu(j,k)=Upclt_xu(j,k)*cos(fiUpcl_xu(j,k)-fiUc1(j,k));
Um1f_proc_xu(j,k)=Um1f_xu(j,k)*100/Uc1t(j,k);
Up1f_proc_xu(j,k)=Up1f_xu(j,k)*100/Uc1t(j,k);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
end

```

