

Analiza harmonske resonance v elektroenergetskih omrežjih

Leopold Herman

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: leopold.herman@fe.uni-lj.si

Povzetek. V prispevku obravnavamo analizo resonančnih ojačenj harmonikov v elektroenergetskih omrežjih, ki zadnja leta hitro pridobiva pomen zaradi intenzivnega umeščanja razpršenih virov energije in novih tipov bremen, kot so toplotne črpalke in električna vozila. Da se zagotovijo ustrezni parametri kakovosti električne energije, primerjamo dve metodi analize harmonskih resonanc: konvencionalno metodo analize vozliščnih frekvenčnih impedančnih karakteristik in sodobnejši pristop z uporabo modalne analize.

Pri uporabi konvencionalne metode, ki temelji na izračunu frekvenčnih karakteristik za posamezna vozlišča, smo soočeni z omejitvami, ko gre za točnost in obseg informacij, ki jih lahko zagotovi. Kot alternativo predstavimo metodo z uporabo modalne analize, ki ponuja bolj natančen in zanesljiv način analize resonančnih stanj omrežja. S transformacijo modela sistema v modalno domeno metoda omogoča ločeno obravnavo posameznih resonančnih stanj in omogoča vpogled v vpliv parametrov elementov omrežja na resonanco.

V zadnjem delu prispevka na modelu realnega industrijskega omrežja primerjamo praktično uporabnost obeh metod za analizo kritičnih resonančnih stanj, identifikacijo vozlišč, ki pri tem v največji meri sodelujejo, in obvladovanje resonančnih pojavov s prilagajanjem parametrov omrežnih elementov.

Ključne besede: resonančna stanja, harmonsko popačenje, modalna analiza, vozliščne impedance

Analysis of Harmonic Resonance in Electrical Power Networks

The paper addresses the issue of harmonics resonance amplifications in electric power networks, for being particularly relevant due to the increasing integration of distributed energy sources and new load types, such as heat pumps and electric vehicles. To ensure appropriate parameters for the electric power quality, two methods of harmonic resonance analysis are compared: the conventional method of analyzing the nodal frequency impedance characteristics and a modern approach of using the modal analysis.

Based on the frequency characteristics calculation for individual nodes, the conventional method faces limitations in terms of the accuracy and scope of information it provides. As an alternative, the paper presents a modal analysis, enabling a more precise and reliable analysis of the network resonant states. By transforming the system model into the modal domain, the modal analysis separately identifies individual resonant states and provides an insight into the impact of the network element parameters on the resonance states.

The paper compares the practical applicability of the two methods on a model of a real industrial network to analyze the critical resonant states, identify the most impacting nodes, and solve the issue of the resonance phenomena by adjusting the parameters of the network elements.

Keywords: resonant states, harmonic distortion, modal analysis, nodal impedances.

1 UVOD

Elektroenergetski sistem (EES) se zadnja leta sooča z množično integracijo razpršenih virov energije (RVE) in toplotnih črpalk (TČ), v prihodnje pa pričakujemo še prehod velikega dela sektorja transporta (električna vozila-EV) na EES. Poleg izzivov na področjih načrtovanja in obratovanja EES, ki jih tako obsežno umeščanje novih tipov bremen prinaša za zagotavljanje učinkovitega, zanesljivega in varnega obratovanja EES, je omenjeni trend tudi izziv, če govorimo o zagotavljanju ustrezne kakovosti električne energije (KEE) [1], [2], [3]. Številna moderna bremena se namreč na EES priključujejo prek močnostnih polprevodniških pretvornikov, ki lahko, če niso ustrezno načrtovani in vodeni, v omrežju močno povečajo emisije harmonikov [4]. Hkrati se, delno tudi kot odgovor na integracijo velikega števila novih bremen, v EES izvajata obsežno kabliranje omrežja (tj. menjava nadzemnih vodov s kablovodi) ter vgradnja večjega števila kompenzatorjev jalove moči (prevladujejo pasivne izvedbe teh naprav – LC-členi). V praksi se zato vse pogosteje soočamo s problemom resonančnih ojačenj harmonikov, ko kapacitivne komponente (kompenzatorji, kablovodi) v kombinaciji z induktivnostmi omrežja (transformatorji) močno ojačijo harmonike, ki so prisotni v omrežju. Posledice močno harmonsko popačenih napetosti in tokov so lahko pregrevanje in s tem krajša življenjska doba nekaterih naprav (transformatorji, kabli,

kompenzatorji ...), nastajanje hrupa in vibracij pri obratovanju motorjev in generatorjev, nepravilno delovanje elektronskih naprav (računalniki, tiskalniki ...), v skrajnih primerih pa tudi izpad naprav iz obratovanja ali celo njihovo uničenje [5], [6].

Zelo pomembno je torej, da imamo na razpolago učinkovite metode analize resonančnih stanj, ki jih lahko uporabimo pri načrtovanju naprav oz. razvoju omrežja, ob vgradnji ali pozneje pri analizi potencialnih težav v obratovanju.

V članku bo najprej predstavljena konvencionalna metoda analize resonanc omrežja (t. i. metoda vozliščnih impedanc), katere uporaba je danes sicer precej uveljavljena [7]–[8], rezultati pa mnogokrat niso popolni oz. točni zaradi pomanjkljivosti metode, ki bodo prav tako predstavljene [9]. Kot odgovor na omejitve konvencionalne metode bomo v nadaljevanju predstavili naprednejšo metodo z uporabo modalne analize, ki omogoča bolj natančno in zanesljivo analizo resonančnih stanj omrežja [10]. Obe metodi bomo primerjali na primeru modela realnega industrijskega omrežja.

2 IMPEDANČNE FREKVENČNE KARAKTERISTIKE SISTEMA

Impedančna frekvenčna karakteristika podaja frekvenčno odvisnost impedance obravnavanega omrežja, ki jo lahko določimo z omrežne ali bremenske strani. Pri analizah EES so študije impedančne frekvenčne karakteristike sistema prav tako pomembne kot študije harmonikov [12]. Odziv sistema na vsako harmonsko komponento nam poda celostno sliko o vplivu, ki ga imajo harmonski tokovi in harmonske napetosti (nelinearna bremena) na popačenja v sistemu.

2.1 Impedanca sistema

Pri osnovni frekvenci je omrežje pretežno induktivnega karakterja, zato je veličina, ki se uporablja za njegovo predstavitev od napajalne točke do mesta obravnave, največkrat kratkostična impedanca. Izračunamo jo kot

$$Z_{ks} \approx R_{ks} + j \cdot X_{ks} = \frac{U_{ks}^2}{S_{ks}} = U_{ks} \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} I_{ks}} \quad (1),$$

pri čemer je:

- Z_{ks} = kratkostična impedanca,
- R_{ks} = kratkostična upornost,
- X_{ks} = kratkostična reaktanca,
- S_{ks} = trifazna kratkostična moč [MVA],
- U_{ks} = medfazna napetost [kV],
- I_{ks} = kratkostični tok [A].

Reaktanca pri h -tem harmoniku je v razmerju do osnovne komponente reaktance X_1 podana z

$$X_h = h \cdot X_1 \quad (2)$$

2.2 Nastanek resonance

Prisotnost paralelno priključenega kapacitivnega elementa (npr. kompenzatorja jalove moči) močno vpliva na impedančno frekvenčno karakteristiko sistema.

Medtem ko induktivna reaktanca narašča proporcionalno s frekvenco, se kapacitivna reaktanca z naraščanjem frekvence zmanjšuje:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} X_C. \quad (3)$$

Slika 1a) prikazuje nadomestno shemo omrežja. Uporabljeni so naslednji simboli: \underline{U}_S napajalna napetost (Theveninova napetost), $\underline{Z}_S = R_S + jX_S$ impedanca napajalnega omrežja (Theveninova impedanca – glejte (1) in (2)), $\underline{Z}_B = R_B + jX_B$ impedanca bremena, $\underline{Z}_C = R + jX_L - jX_C$ impedanca kompenzatorja, \underline{U}_C napetost na mestu priključitve kompenzatorja in I_C tok kompenzatorja.

Theveninov vir napetosti, ki ponazarja napajalno omrežje, in tokovni vir, ki ponazarja nelinearna bremena, sta podana kot

$$\underline{U}_S = \underline{U}_{S,1} + \sum_{h=2}^n \underline{U}_{S,h} \quad U_S = \frac{1}{2\pi f C} X_C \quad (4)$$

$$I_B = I_{B,1} + \sum_{h=2}^n I_{B,h} \quad (5),$$

kjer h podaja red harmonika.

2.2.1 Serijska resonanca

Za ekvivalentno (serijsko) impedanco z omrežne strani lahko zapišemo naslednji izraz (glejte sliko 1b)

$$Z_{ser,h} = R_S + j \cdot h \cdot X_{S,1} + R + j \cdot h \cdot X_{L,1} - j \cdot$$

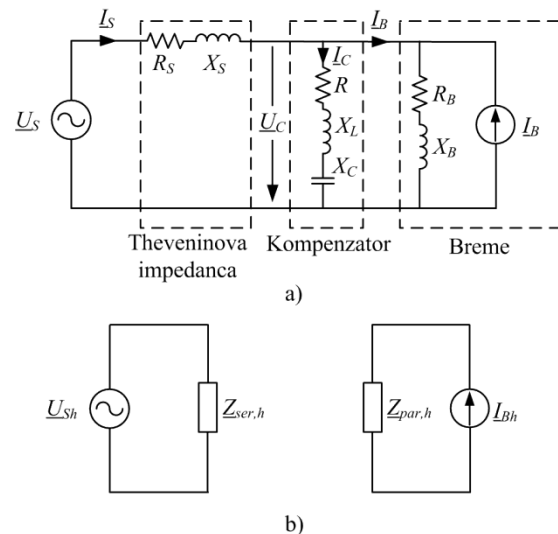
$$\frac{X_{C,1}}{h} \quad (6)$$

Če zanemarimo upornost in reaktanco kompenzatorja pri h -tem harmoniku, dobimo

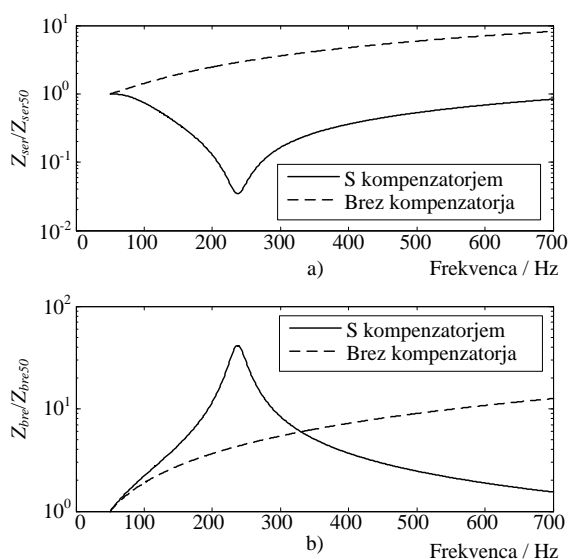
$$Z_{ser,h} \approx R_S + j \cdot h \cdot X_{S,1} - j \frac{X_{C,1}}{h} \quad (7)$$

$$Z_{ser}^{f_{r-s}} \approx R_S \quad (8)$$

Ekvivalentna impedanca serijsko vezanih impedanc omrežja in kompenzatorja postane zelo majhna v bližini serijske resonančne točke f_{r-s} in navzdol omejena le z upornostjo omrežja R_S . Tako lahko že zelo majhna harmonska komponenta v napajalni napetosti \underline{U}_S , ki sovпада z resonančno frekvenco, povzroči zelo velik harmonski tok te frekvence. Posledično močno naraste



Slika 1: Ekvivalentno vezje omrežja: a) enopolna shema, b) serijska ekvivalentna impedanca in paralelna ekvivalentna impedanca.



Slika 2: Impedančno frekvenčne karakteristike sistema: a) gledano z omrežne strani, b) gledano z bremenske strani.

tudi harmonik v napetosti na mestu priključitve kompenzatorja.

2.2.2 Paralelna resonanca

Podobna izpeljava kot za serijsko velja tudi za paralelno resonanco. Ekvivalentna (paralelna) impedanca omrežja z bremenske strani je podana z izrazom (glejte sliko 1b)

$$Z_{par,h} = \frac{(j \cdot h \cdot X_{L,1} - j \cdot \frac{X_{C,1}}{h}) \cdot (R_S + j \cdot h \cdot X_{S,1})}{(j \cdot h \cdot X_{L,1} - j \cdot \frac{X_{C,1}}{h}) + (R_S + j \cdot h \cdot X_{S,1})} \quad (9)$$

$$Z_{par,h} \approx \frac{(-j \cdot \frac{X_{C,1}}{h}) \cdot (j \cdot h \cdot X_{S,1})}{(-j \cdot \frac{X_{C,1}}{h}) + (R_S + j \cdot h \cdot X_{S,1})} \quad (10)$$

$$Z_{par,h} \approx \frac{(\frac{X_{C,1}}{h})^2}{R_S} = \frac{(h \cdot X_{S,1})^2}{R_S} \quad (11)$$

$$Z_{par}^{f_r-p} \approx \frac{(X_C)^2}{R_S} = \frac{(X_S)^2}{R_S} \quad (12)$$

Ker je $X_S \gg R_S$, postane vrednost impedanca $Z_{par}^{f_r-p}$ zelo visoka v bližini paralelne resonančne točke f_{r-p} . Posledično lahko že zelo majhna harmonska komponenta toka povzroči zelo velik padec napetosti na ekvivalentni impedanci $Z_{par}^{f_r-p}$, kar povzroči tudi veliko povečanje harmonske komponente napetosti na mestu priključitve kompenzatorja.

Impedančne frekvenčne karakteristike hipotetičnega sistema v resonanci prikazuje slika 2, kjer Z_{bre} in Z_{ser} označujeta absolutni vrednosti nadomestnih impedanc omrežja (normiranih na impedanco pri osnovnem harmoniku), gledano z bremenske in omrežne strani. S slike sta jasno razvidni serijska (slika 2a) in paralelna resonanca (slika 2b). Obe nastopita pri frekvenci 250 Hz. Kot navaja literatura [5], so značilni harmoniki v omrežju največkrat 3., 5., 7., 11., 13. itd., pri čemer največje amplitude dosežata, poleg 3. komponente, ki jo je mogoče omejiti z delta vezavo transformatorja, predvsem 5. in 7. Če torej v omrežju pride do impedančnih razmer, ki jih prikazuje slika 2, bi to neizogibno vodilo v visoko

resonančno ojačenje 5. harmonske komponente v napetosti in toku. Paralelna resonanca na sliki 2 namreč nastopa ravno pri tej harmonski komponenti.

Pojav resonance je v industriji precej pogost. Nemalokrat kompenzator jalove moči (kapacitivni element) več let obratuje v resonanci, kar seveda močno skrajša njegovo življenjsko dobo, ne da bi se tega sploh zavedali [5]. Tudi eksplozija kompenzatorja zaradi pregrevanja ni redek pojav. Razlog, da se za kompenzacijo jalove moči v največji meri še vedno vgrajujejo pasivne izvedbe kompenzatorjev, je relativno nizka cena. V industriji torej obstaja velika potreba po učinkovitih metodah analize resonančnih stanj.

3 ANALIZA HARMONSKIH REZONANČNIH STANJ

Analizo resonančnih stanj omrežja največkrat izvajamo ob vgradnji novih (nelinearnih) naprav oz. ob vgradnji večjih kompenzatorjev jalove moči v omrežje. Pri tem nas zanimajo predvsem:

- Frekvenčna karakteristika impedanca za tista vozlišča omrežja, kjer je predvidena priključitev.
- Točke (frekvence) paralelnih in serijskih resonanc.
- Amplitude impedanca v resonančnih točkah.
- Občutljivosti amplitud impedanca pri resonančnih frekvencah za variacije parametrov elementov omrežja (vključno z elementi kompenzatorjev jalove moči).
- Občutljivost frekvenc resonančnih točk za variacije parametrov elementov omrežja.

V nadaljevanju predstavljamo dve metodi, s katerima lahko poiščemo odgovore na zgornja vprašanja.

3.1 Metoda vozliščnih impedanc

Pri konvencionalni metodi vozliščnih impedanc analizo izvajamo v naslednjih korakih [7]:

1. Izračun impedančno frekvenčne karakteristike za vsa vozlišča obravnavanega omrežja. Omrežje se lahko predstavi z vozliščno impedančno matriko Z_h , tako da velja:

$$U_h = Z_h I_h, \quad (13)$$
 kjer sta U_h vektor harmonskih napetosti in I_h vektor harmonskih tokovnih injekcij.
2. Določitev resonančnih točk na osnovi izračunanih frekvenčnih karakteristik.
3. Visoka vrednost vozliščne impedanca (vrh) pri določeni frekvenci (resonančni frekvenci), kjer karakteristika preide iz naraščajoče v padajočo oz. zamenja karakter iz induktivnega v kapacitivnega, predstavlja paralelno resonanco (slika 2b). Tu lahko tokovna injekcija resonančne frekvence (I_{fr}) povzroči velik padec napetosti.
4. Nizka vrednost pri resonančni frekvenci, kjer karakteristika preide iz kapacitivne v induktivno, predstavlja serijsko resonančno točko (slika 2a). Tu

lahko napetostni harmonik resonančne frekvence (U_{fr}) povzroči velik tok.

5. Izračun harmonskih pretokov moči.

S tem postopkom ne dobimo neposrednih informacij o vplivu elementov, ki so ključni za pojav posamezne resonančne točke. Pomembne omejitve analize resonanc, na katere metoda vozliščnih impedanc ne da odgovora, so še:

- Vloga (pomen) vozlišč pri posameznih resonancah.
- Občutljivost amplitude in frekvence resonance za spremembe elementov.
- 'Prava frekvenca' resonance.
- Nepreglednost (grafična metoda).
- Zamudnost.

3.2 Modalna analiza

Kot odgovor na zgornje pomanjkljivosti metode vozliščnih impedanc v nadaljevanju predstavljamo naprednejšo metodo z uporabo modalne analize [10].

Modalna analiza je na splošno matematično orodje za analizo dinamičnih lastnosti sistemov v frekvenčni domeni, s katerim nihanja ločimo na posamezne nihajne načine. Kot bo razvidno v nadaljevanju, jo lahko uporabimo tudi za analize resonančnih ojačenj harmonikov [9].

3.2.1 Transformacija v modalno domeno

Prva koraka metode sta zapis modela obravnavanega sistema v obliki admitančne matrike \mathbf{Y} in transformacija matrike v modalno domeno. Admitančno matriko lahko zapišemo v obliki

$$\mathbf{Y} = \mathbf{L}\mathbf{A}\mathbf{T}, \quad (14)$$

kjer so \mathbf{A} matrika lastnih vrednosti ter \mathbf{L} in \mathbf{T} matriki levih oz. desnih lastnih vektorjev. Vse veličine so frekvenčno odvisne. Če enačbo 14 nekoliko izpeljemo in pri tem upoštevamo, da je $\mathbf{L} = \mathbf{T}^{-1}$, dobimo enačbo 15, ki popisuje napetostno-tokovne razmere v modalnem prostoru.

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{J}, \quad (15)$$

V enačbi 15 je $\mathbf{V} = \mathbf{T}\mathbf{U}$ in $\mathbf{J} = \mathbf{T}\mathbf{I}$. \mathbf{J} je vektor modalnih tokov in \mathbf{V} vektor modalnih napetosti, od katerih vsak element pripada enemu načinu.

Če enačbo 15 izpišemo v matrični obliki, pri čemer velja, da je inverz matrike lastnih vrednosti \mathbf{A}^{-1} enak matriki modalnih impedanc \mathbf{Z}_m .

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{m,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & z_{m,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & z_{m,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Iz enačbe 16 lahko ugotovimo:

- Posamezen modalni tok J_n ima vpliv le na eno modalno impedanco (\mathbf{Z}_m je diagonalna), kar pomeni, da so posamezni načini med seboj neodvisni. To omogoča neodvisno obravnavo posameznih resonančnih stanj, kar konvencionalna metoda ne omogoča.

- Lastna vrednost in modalna impedanca sta (na splošno) kompleksni števili. Pri analizi harmonskih resonančnih pojavov nas zanimata njuni absolutni vrednosti na celotnem opazovanem frekvenčnem spektru. Ker sta veličini inverzni vrednosti druga druge, je dovolj opazovati le eno od njiju.
- V praksi opazujemo amplitudo modalne impedance, na podlagi katere v nadaljevanju določimo način, ki opisuje opazovani resonančni pojav. To naredimo tako, da poiščemo modalno impedanco, ki ima pri opazovani resonančni frekvenci maksimum. Način, ki se nanaša na takšno modalno impedanco, imenujemo resonančni način, saj določa resonanco.

3.2.1.1 Lastni vektorji

Matriki levih in desnih lastnih vektorjev sta matematična operatorja, prek katerih se izvede preslikava tokov in napetosti med faznim prostorom in modalnim prostorom. To pomeni, da lahko s pomočjo lastnih vektorjev ovrednotimo prispevek posameznega resonančnega načina k resonančnim pojavom.

Matrika desnih lastnih vektorjev je povezava med vozliščnimi in modalnimi tokovnimi injekcijami. Sestavljajo jo desni lastni vektorji, ki so enaki vrsticam matrike desnih lastnih vektorjev. Za i -ti način, kjer je $i = 1, \dots, n$, so to vsi neničelni vektorji, ki izpolnjujejo enačbo $\mathbf{t}_i \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{t}_i \cdot \lambda_i$. Zapiše se v obliki

$$\mathbf{t}_i = [t_{i,1} \quad t_{i,2} \quad \cdots \quad t_{i,n}],$$

medtem ko je vektor vozliščnih tokovnih injekcij enak

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Modalni tok i -tega načina J_i je tako enak skalarnemu produktu desnega lastnega vektorja in vektorja vozliščnih tokovnih injekcij

$$J_i = [t_{i,1} \quad t_{i,2} \quad \cdots \quad t_{i,n}] \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Za desni lastni vektor pravimo, da podaja informacijo o impedančni vodljivosti, saj z injekcijo v vozlišče, na katero se nanaša največji element desnega lastnega vektorja, za i -ti način dosežemo največji modalni tok ter posledično modalno napetost [9].

Matrika levih lastnih vektorjev je povezava med modalnimi napetostmi in vozliščnimi napetostmi. Sestavljajo jo levi lastni vektorji, ki so enaki stolpcem matrike levih lastnih vektorjev. Za i -ti način, kjer je $i = 1, \dots, n$, so to vsi neničelni vektorji, ki izpolnjujejo enačbo $\mathbf{Y} \cdot \mathbf{l}_i = \lambda \cdot \mathbf{l}_i$. Zapiše se v obliki

$$\mathbf{l}_i = \begin{bmatrix} l_{1,i} \\ l_{2,i} \\ \vdots \\ l_{n,i} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Vozliščne napetosti, izražene z levimi lastnimi vektorji in modalnimi napetostmi, so enake

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{1,1} \\ l_{2,1} \\ \vdots \\ l_{n,1} \end{bmatrix} V_1 + \begin{bmatrix} l_{1,2} \\ l_{2,2} \\ \vdots \\ l_{n,2} \end{bmatrix} V_2 + \dots + \begin{bmatrix} l_{1,n} \\ l_{2,n} \\ \vdots \\ l_{n,n} \end{bmatrix} V_n. \quad (20)$$

Iz zapisa zgornje enačbe je razvidno, da je prispevek i -te modalne impedance v opazovanem vozlišču j odvisen od elementa i -tega lastnega vektorja, ki se nanaša na vozlišče j . Za levi lastni vektor tako pravimo, da podaja informacijo o impedančni spoznavnosti [9].

3.2.2 Občutljivostni koeficienti

Glavna vrednost lastnih vektorjev je, da jih lahko uporabimo za izračun občutljivostnih koeficientov. Te določimo zato, ker je treba za učinkovito analizo in omejevanje resonančnih pojavov poznati vpliv parametrov omrežnih elementov na modalne impedance ter posledično tudi na vozliščne impedance. Parameter omrežnega elementa označimo z grško črko α in je lahko upornost, induktivnost ali kapacitivnost elementa. Ideja izračuna občutljivosti neke modalne impedance za spremembo parametra α je prikazana na sliki 3 [13].

4 PRIMERJAVA METOD NA PRIMERU INDUSTRIJSKEGA OMREŽJA

Obe metodi analize resonanc v nadaljevanju preizkusimo na modelu realnega industrijskega elektroenergetskega omrežja.

Podrobnosti o elementih in parametrih modeliranega omrežja so predstavljene v naslednjem podpoglavju, v nadaljevanju pa še rezultati analize.

4.1 Podatki modeliranega industrijskega omrežja

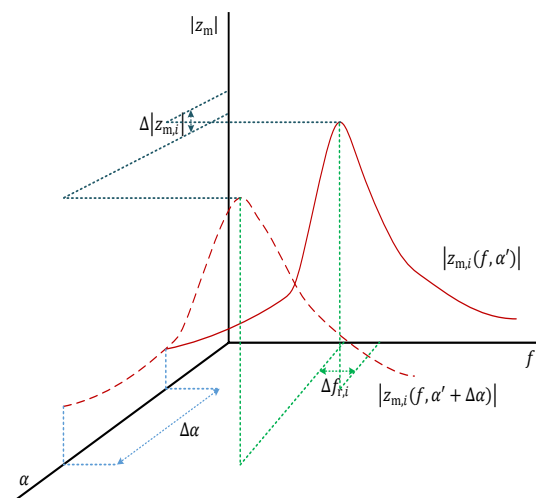
Poenostavljena enopolna shema modeliranega industrijskega omrežja je prikazana na sliki 4. Omrežje je razdeljeno na tri glavne sklope.

Zbiralka sistema I (vozlišče 7) napaja sekundar tronavitnega transformatorja TR VII. Na tej zbiralki obratujeta pasivna kompenzatorja jalove moči K1 in K2, napaja pa se tudi večje število transformatorskih postaj (TP) SN/NN. V analizo je bila vključena le ena TP SN/NN, ki je na sliki prikazana z vozlišči 8 in 9. Na strani NN obratuje kompenzator jalove moči K3.

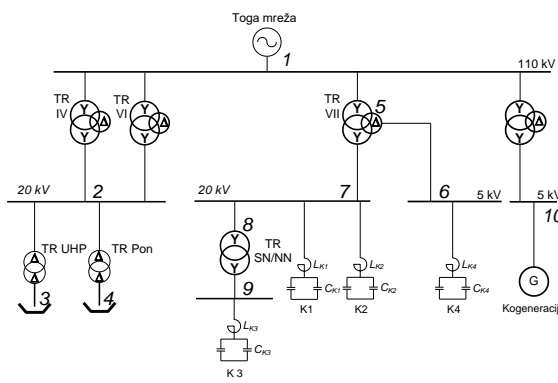
Drugi del, sistem II, je napajen prek transformatorjev TR 1 in 2, na katera so priključena nelinearna bremena prek transformatorjev TR UHP in TR Pon. V tem delu omrežja kompenzatorji jalove moči niso prisotni.

Vozlišče 6 predstavlja omrežje na napetostnem nivoju 5 kV, ki se napaja prek terciarja transformatorja TR VII. Tu so priključeni bremena in kompenzator K4.

V vozlišču 10 obratuje generator kogeneracijske enote. Na sliki opazimo še vozlišče 5, ki nima posebnega pomena pri analizi in je zgolj matematične narave. Podatki o posameznih elementih modeliranega omrežja so predstavljeni v tabelah 1, 2 in 3.



Slika 3: Vpliv spremembe velikosti parametra α na modalno impedanco [10].



Slika 4: Enopolna shema modeliranega industrijskega omrežja z več kompenzatorji jalove moči.

Tabela 1: Nazivni podatki transformatorjev modeliranega industrijskega omrežja.

| TR | Prestava (kV/kV/kV) | Moč (MVA) | u_k (%) |
|----------|---------------------|-----------|------------------|
| TR V | 110/20 | 20 | 10,20 |
| TR VI | 110/20 | 20 | 10,20 |
| TR VII | 110/20/5 | 40/30/10 | 10,05/11,89/7,84 |
| TR SN/NN | 20/0,4 | 1 | 8,00 |
| TR UHP | 20/229,9 | 36 | 4,11 |
| TR VPP | 20/250,2 | 8 | 8,07 |

Tabela 2: Nazivni podatki kompenzatorjev modeliranega industrijskega omrežja.

| Kompenzator | Napetost (kV) | Nazivna moč (MVar) | Resonančna frekvenca (Hz) |
|-------------|---------------|--------------------|---------------------------|
| K1 | 20 | 6,3 | 395 |
| K2 | 20 | 2,1 | 264 |
| K3 | 0,4 | 0,6 | / |
| K4 | 5 | 2,0 | 980 |

Tabela 3: Preostali podatki modeliranega industrijskega omrežja.

| Element | Parameter | Vrednost |
|------------|-------------|----------|
| Generator | S_n / MVA | 8,1 |
| | X_d / % | 22 |
| | R/X | 1/10 |
| Toga mreža | S_k | 1300 |
| | R/X | 1/10 |

4.2 Rezultati

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati analize resonanc z uporabo metode vozliščnih impedanc in modalne analize.

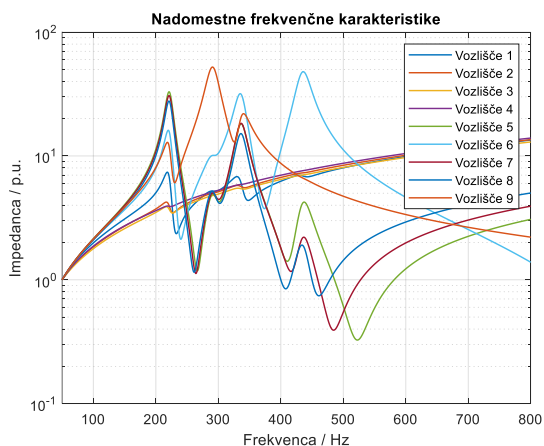
4.2.1 Metoda vozliščnih impedanc

Na sliki 5 so prikazane frekvenčne karakteristike vozliščnih impedanc. Razvidno je, da obstaja več vozlišč, pri katerih je možnost zaporedne resonance pri 5. in 7. harmoniku, vendar pa je iz slike težko ugotoviti vzroke za to. Razvidno je še, da frekvenčne karakteristike vozlišč 2, 3 in 4 sledijo karakteristiki, ki bi se pojavila, če kompenzacije ne bi bilo. To pomeni, da je vpliv kompenzacije na ta tri vozlišča najmanjši, saj so tudi najdlje od nje in so vplivi zadušeni.

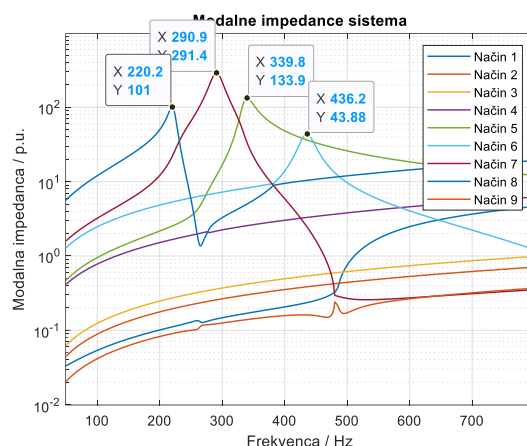
4.2.2 Metoda z uporabo modalne analize

Spodaj so prikazani naslednji rezultati analize resonanc v industrijskem sistemu, kjer se (zaradi omejitev prostora) osredotočamo zgolj na 7. harmonsko komponento.

- Na sliki 6 so prikazane modalne impedance sistema.
- V tabeli 4 so podani participacijski faktorji posameznih vozlišč.
- V tabeli 5 in na sliki 7 so prikazane občutljivosti lastne vrednosti in resonančne frekvence posamezne modalne impedance za spremembo parametrov elementov.



Slika 5: Frekvenčne karakteristike vozliščnih impedanc poenostavljenega industrijskega omrežja.



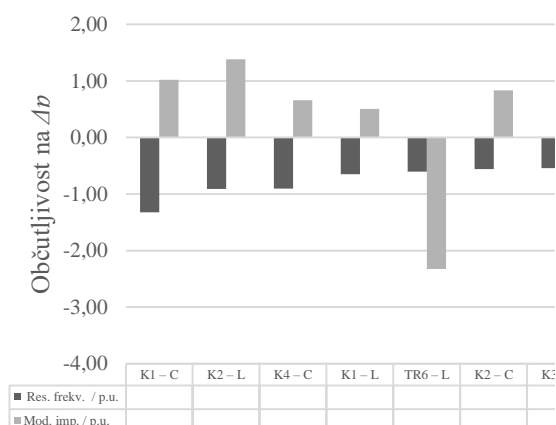
Slika 6: Modalne impedance poenostavljenega industrijskega omrežja.

Tabela 4: Participacijski faktorji posameznih vozlišč.

| Resonančna frekvenca in način | 290,64 Hz Način 7 | | 340 Hz Način 5 | |
|---|----------------------|-------|-------------------|--------|
| Participacijski faktorji posameznih vozlišč | 9 | 0,983 | 9 | 0,8350 |
| | 6 | 0,007 | 6 | 0,1616 |
| | 8 | 0,005 | 5 | 0,0433 |
| | 5 | 0,004 | 7 | 0,0401 |
| | 7 | 0,004 | 8 | 0,0370 |
| | 1 | / | 1 | / |
| | 2 | / | 2 | / |
| | 3 | / | 3 | / |
| | 4 | / | 4 | / |

Tabela 5: Občutljivosti resonančne frekvence in lastne vrednosti modalne impedance načina 5 za spremembo posameznih parametrov elementov.

| Parameter | $\frac{\partial f_{r,5}}{\partial \alpha}$ / pu/100 % | $\frac{\partial z_{m,5} }{\partial \alpha}$ / %/100 % |
|-----------|---|--|
| K1 – C | -1,323 | 1,019 |
| K2 – L | -0,908 | 1,384 |
| K4 – C | -0,905 | 0,660 |
| K1 – L | -0,647 | 0,504 |
| TR6 – L | -0,603 | -2,323 |
| K2 – C | -0,560 | 0,836 |
| K3 – C | -0,542 | -3,442 |



Slika 7: Občutljivostni koeficienti resonančnega načina 5.

V analizi smo se osredotočili na resonanco pri eni izbrani resonančni frekvenci 350 Hz. S pomočjo analize lastnih vektorjev in participacijskih faktorjev resonančnih načinov smo identificirali vozlišča, ki so najbolj kritična za pojav močnejših harmonskih popačenj napetosti.

Kot je prikazano na sliki 5, obstaja možnost paralelne resonance pri 7. harmonski frekvenci v vozliščih 1, 5, 6, 7, 8 in 9. Kot že omenjeno, so modalne impedance povezane z absolutnimi vrednostmi impedanc posameznih vozlišč, kar potrjujejo tudi participacijski faktorji, prikazani v tabeli 4. Med omenjenimi vozlišči, vozlišče 5 ni bilo analizirano, saj je matematični dodatek in fizično ne obstaja, vozlišče 1 pa ima nižjo povečanje amplitude impedance pri 7. harmonski frekvenci v primerjavi z drugimi obravnavanimi napajalnimi mesti.

Modalna impedanca načina 5 ima resonančno frekvenco, ki je najbližje frekvenci 7. harmonske komponente (350 Hz), hkrati pa ima najvišjo vrednost pri tej frekvenci. To pomeni, da je treba način 5 podrobneje analizirati, da bi omilili potencialno vzporedno resonanco pri 7. harmonski komponenti.

Iz lastnih vektorjev in participacijskih faktorjev, predstavljenih v tabeli 4, je razvidno, da ima najvišjo magnitudo impedance vozlišče 9, sledi mu amplituda impedance vozlišča 6, kar je skladno z absolutnimi vrednostmi impedance iz slike 5. Vendar pa normirane vrednosti vozliščne impedance kažejo, da je največje relativno povečanje magnitude impedance v vozlišču 6, sledijo pa mu impedance vozlišč 9, 7, 5 in 8. Glede na največje povečanje magnitude impedance v vozlišču 6 sklepamo, da lahko pričakujemo najresnejše posledice vzporedne resonance 7. prav v tem vozlišču.

Magnituda modalne impedance in občutljivostni koeficienti resonančne frekvence parametrov z največjim vplivom na resonančno frekvenco so prikazani v tabeli 5 in sliki 7.

Iz tabele 5 in slike 7 je razvidno, da so elementi z najvišjimi koeficienti občutljivosti za frekvenco locirani v vozliščih od 6 do 9, kjer so nameščeni kompenzatorji jalove moči. Kapacitivnost kompenzatorja K1 ima

najvišjo občutljivost za resonančno frekvenco, sledijo še induktivnost kompenzatorja K2, kapacitivnost kompenzatorja K4 in induktivnost kompenzatorja K1. Občutljivostni koeficienti preostalih elementov so le nekoliko nižji, kar nakazuje, da pri obravnavani resonanci sodeluje večje število elementov omrežja.

Na velikost modalne impedance resonančnega načina 5 v največji meri vpliva kapacitivnost kompenzatorja K3. Opazimo lahko, da je od vseh parametrov kompenzatorjev ta edini z negativno vrednostjo. To pomeni, da lahko s prilagoditvijo tega parametra vplivamo na znižanje vrednosti impedance, ki jo v resonanci dosega način 5.

Iz rezultatov (sliki 6 in 7, tabeli 4 in 5) obravnave resonančnih ojačenj harmonikov z uporabo modelne impedance lahko zaključimo:

1. Obstaja več vozlišč, pri katerih obstaja možnost zaporedne resonance pri 5. in 7. harmoniku. V analizi smo se osredotočili na resonanco pri eni izbrani resonančni frekvenci 350 Hz.
2. Modalna impedanca načina 5 ima resonančno frekvenco, ki je najbližje frekvenci 7. harmonske komponente (350 Hz).
3. Iz lastnih vektorjev in participacijskih faktorjev, predstavljenih v tabeli 4, je razvidno, da ima najvišjo magnitudo impedance vozlišče 9, ki je tako najbolj problematično, kar zadeva ojačenja harmonskih komponent.
4. Kapacitivnost kompenzatorja K1 ima najvišjo občutljivost na resonančno frekvenco, na velikost modalne impedance resonančnega načina 5 pa v največji meri vpliva kapacitivnost kompenzatorja K3.
5. Glede na rezultate, predstavljene v tabeli 5, lahko ugotovimo, da bi bilo za omilitev resonance načina 5 najbolj smiselno prilagoditi kapacitivnost kompenzatorja K1 in induktivnost kompenzatorja K2.

5 ZAKLJUČEK

V prispevku je bila predstavljena primerjava dveh metod za analizo resonančnih ojačenj harmonikov v elektroenergetskih omrežjih: konvencionalna metoda analize vozliščnih impedanc in sodobnejša metoda z uporabo modalne analize. Ugotovitve kažejo, da medtem ko tradicionalna metoda omogoča poenostavljeno razumevanje frekvenčnih karakteristik omrežja, se njena uporabnost zmanjša zaradi omejitev v natančnosti in celovitosti informacij, ki jih lahko zagotovi. Kot pomanjkljivosti konvencionalne metode se pokažeta še nepreglednost in zamudnost.

Modalna analiza, nasprotno, ponuja bolj natančen in celovit vpogled v resonančna stanja omrežja. Ta metoda omogoča neodvisno obravnavo posameznih resonančnih stanj ter podrobno razumevanje stanja omrežja in vpliva kapacitivnih in induktivnih elementov na resonanco.

V prispevku pokažemo, da resonanco razumemo kot modalni način, ki je povezan z omrežjem, in ne izhaja neposredno iz tokovne injekcije v določeno vozlišče.

Participacijski faktor, ki predstavlja, kako enostavno je mogoče vzbuditi določen modalni način v posameznem vozlišču in kako izrazito se ta način pojavi, je pomemben za razumevanje nastanka resonance. Najvišji participacijski faktor označuje središče resonance. Ugotovimo še, da število kritičnih načinov ustreza številu kapacitivnih elementov v omrežju, pri čemer vsak element prispeva k posameznemu načinu.

Poleg identifikacije kritičnih načinov v prispevku predstavimo tudi način izboljšanja stanja resonančnih ojačenj. Z določitvijo kritičnih vozlišč namreč ugotovimo, kateri elementi omrežja sodelujejo pri posameznih resonančnih načinih, z občutljivostno analizo pa določimo še, s katerimi parametri elementov omrežja najlažje dosežemo dušenje resonančnih pojavov.

Z uporabo predstavljene metode torej lahko učinkovito zmanjšamo resonančna ojačenja harmonikov in tveganja, povezana z resonančnimi pojavi, kar je ključnega pomena za zanesljivo in varno delovanje sodobnega EES.

LITERATURA

- [1] Surya Santoso, P.D.; McGranaghan, M.F.; Dugan, R.C.; Beaty, H.W. *Electrical Power Systems Quality*, Third Edition; McGraw-Hill Education, 2012; ISBN 978-0-07-176155-0.
- [2] EN 50160 – Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks 2010.
- [3] J. Bevc, M. Pantoš, J. Bogovič, R. Mihalič, Določitev parametrov regulabilnih naprav v EES – primer preprečevanja preobremenitev zaradi stohastike OVE, *Elektrotehniški vestnik* 90(1-2): 39–44, 2023.
- [4] A. Božiček, L. Herman, B. Blažič, Vpliv statičnega var kompenzatorja na harmonsko popačenje v slovenskem prenosnem omrežju *Elektrotehniški Vestnik*; Ljubljana Vol. 87, Iss. 4, (2020): 147–155.
- [5] Jos Arrillaga; Neville R. Watson *Power System Harmonics*, 2nd Edition; Wiley;
- [6] C4/B4 Technical Brochure – Network Modelling for Harmonic Studies 2019.
- [7] Xiao Jiang; Gole, A.M. A Frequency Scanning Method for the Identification of Harmonic Instabilities in HVDC Systems. *IEEE Trans. Power Delivery* 1995, 10, 1875–1881, doi:10.1109/61.473368.
- [8] Papić, I.; Gole, A.M. Frequency Response Characteristics of the Unified Power Flow Controller. *IEEE Transactions On Power Delivery* 2003, 18, 9.
- [9] Xu, Z. Huang, Y. Cui, in H. Wang, Harmonic resonance mode analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, let. 20, št. 2, str. 1182–1190, apr. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.834856.
- [10] J. Lokar, J. Dolenc, B. Blažič in L. Herman, Harmonic Resonance Identification and Mitigation in Power System Using Modal Analysis, *Energies*, let. 14, št. 13, str. 4017, 2021, doi: 10.3390/en14134017.
- [11] J. Lokar, Analiza harmonskih resonančnih pojavov v elektroenergetskih omrežjih z uporabo modalne analize, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2021.
- [12] L. Herman, I. Papić, Optimalno vodenje kompenzatorjev jalove moči v industrijskih – koncept virtualnega kompenzatorja, *Elektrotehniški vestnik* 78(1-2): 54–60, 2011.
- [13] Y. Cui in X. Wang, Modal Frequency Sensitivity for Power System Harmonic Resonance Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, let. 27, št. 2, str. 1010–1017, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2185520.

Leopold Herman je diplomiral leta 2008 in doktoriral leta 2014 na Fakulteti za elektrotehniko Univerza v Ljubljani. Trenutno je na isti fakulteti zaposlen kot raziskovalec v Laboratoriju za električna omrežja in naprave. Njegovo raziskovalno delo obsega področje kakovosti električne energije.