

Vpliv višjih harmonskih komponent toka na povečanje izgub v prenosnem vodu

Miran Rošar¹, Gorazd Štumberger²

¹ELEKTRO CELJE d.d., Vrunčeva 2a, 3000 Celje, Slovenija

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

E-mail: miran.roser@elektro-celje.si, gorazd.stumberger@uni-mb.si

Povzetek. V članku so obravnavane izgube na prenosnem vodu, kjer vsebujejo toki in napetosti višje harmonske komponente. Članek je osredotočen na določitev tistega dela joulskih izgub, ki ni nujno potreben, se mu je mogoče izogniti in tako zmanjšati stroške prenosa električne energije. Kot metoda za določitev izgub je uporabljena ortogonalna razstavitev toka na dve komponenti, od katerih je prva v smeri napetosti in jo potrebujemo za usmerjen prenos električne energije od izvora k porabniku, druga pa ortogonalna na napetost, ki povzroča recipročno pretakanje energije med virom in porabnikom.

Ključne besede: prenosni vod, višji harmoniki, izgube pri prenosu, ortogonalne razstavitve toka

The impact of current higher harmonic components on increase of transmission line losses

Extended abstract. This work analyses transmission line losses in a 35 kV distribution network where currents and voltages contain higher harmonic components. They are caused by a nonlinear load – a rectifier with rated power of 4,7 MVA. In the network shown in Figure 1, currents and voltages are measured in point M1 at 110 kV. They are shown in Figure 2. Voltages and currents measured at 35 kV in points M2 and M3, respectively, are shown in Figure 3, while their amplitude spectra are shown in Figures 4 and 5.

An orthogonal decomposition in the time domain is made in order to decompose currents measured at 35 kV into two orthogonal components. To allow for orthogonal decomposition, current and voltage vectors, $\mathbf{i}(t)$ and $\mathbf{u}(t)$, are introduced by (11). Norms or RMS values of both vectors, $I(t)$ and $U(t)$, are given by (12) and (13), the average active power $P(t)$ is calculated by (15), while (16) introduces the equivalent conductivity of the three-phase system $G_e(t)$. Two orthogonal components of the current vector $\mathbf{i}(t)$, marked with $\mathbf{i}_u(t)$ and $\mathbf{i}_{uo}(t)$, are introduced by (17) and (18). The first one is co-linear with the voltage vector and is indispensable for the energy transmission. The second one is orthogonal to the current vector. It is responsible for reciprocal energy exchange between the source and

load. The average value of this energy exchange equals zero. Vectors $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{i}(t)$, $\mathbf{i}_u(t)$ and $\mathbf{i}_{uo}(t)$ are shown in Figure 6. Instantaneous powers $p(t)$, $p_s(t)$ and $p_q(t)$ are defined by (19) with vectors $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{i}(t)$, $\mathbf{i}_u(t)$ and $\mathbf{i}_{uo}(t)$, while their integrals are energies given by (20). Powers (19) and energies (20) are shown in Figure 7. Transmission line instantaneous power losses (21), (22) and (23) are defined with current vectors $\mathbf{i}(t)$, $\mathbf{i}_u(t)$ and $\mathbf{i}_{uo}(t)$. Integrals of these power losses are energy losses (24) to (26), which are all together shown in Figure 8. The energy losses (24) to (26) are then used to calculate average power losses (27) to (29). For daily diagram of transmitted energy shown in Figure 9, average daily transmission line losses, due to the current vectors $\mathbf{i}(t)$, $\mathbf{i}_u(t)$ and $\mathbf{i}_{uo}(t)$, are calculated. They are shown in Figure 10. Figure 11 shows average losses per month caused by the current vector and its orthogonal components. For the given case it is shown that the total monthly transmission line losses caused by the current vectors $\mathbf{i}(t)$, $\mathbf{i}_u(t)$ and $\mathbf{i}_{uo}(t)$ are 33.59 MWh, 32.45 MWh and 3.14 MWh, respectively. The transmission losses due to the current $\mathbf{i}_u(t)$ cannot be avoided, because $\mathbf{i}_u(t)$ is the minimal current vector needed for energy transmission. On the contrary, the current vector $\mathbf{i}_{uo}(t)$ represents only a reciprocal energy exchange between the source and load, which must be avoided in order to minimize transmission line losses.

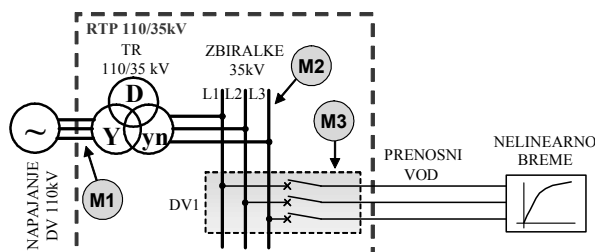
Keywords: transmission line, higher harmonic components, transmission losses, orthogonal decomposition of currents

1. Uvod

V članku obravnavamo razmere v sredjenapetostnem omrežju, ki napaja večje nelinearno breme – usmerniško napravo moči 4,7 MVA. Ta vnaša v toke znaten delež višjih harmonskih komponent. Za izmerjene časovne poteke tokov in napetosti opravimo harmonsko analizo. V nadaljevanju s pomočjo ortogonalne razstavitve tokov v časovnem območju določimo tiste komponente toka, ki pripomorejo k usmerjenemu pretoku energije, in tiste komponente toka, ki povzročajo recipročno pretakanje energije med virom in porabnikom. Pri tem je potrebno poudariti, da toki in napetosti vsebujejo tudi višje harmonske komponente. S pomočjo ortogonalnih komponent toka ovrednotimo izgube energije na prenosnem vodu. Pri tem določimo tisti del izgub, ki se mu ne moremo izogniti pri usmerjenem prenosu energije in danem profilu moči porabnika, in tisti del izgub, ki se mu je mogoče izogniti in so s stališča usmerjenega prenosa energije povsem nepotrebne.

2. Opis meritev

Shema napajalne proge, na kateri so bile izvedene meritve, prikazuje slika 1. Sestavlja jo napajalni del, ki ga predstavljajo 110 kV daljnovodi, katerih skupna kratkostična moč na 110 kV zbiralkah znaša 3991 MVA. Energija se z napetostnega nivoja 110 kV pretvori na nivo 35 kV s pomočjo energetskega transformatorja 110/35 kV, moči 20 MVA, vezave Yd5. Prenosni vod 35 kV sestavljata del kablovoda in prostozračni vod. Kablovod tvori kabel IPZO 13 s prerezom $3 \times 95 \text{ mm}^2$ iz bakra, dolg je 318 metrov. Prostozaračni vod je dolg 1089 m in je sestavljen iz Al-Fe vrvi prereza $120/20 \text{ mm}^2$. Nelinearno breme, priključeno na omenjeni sredjenapetostni vod, je usmerniška naprava moči 4,7 MVA.



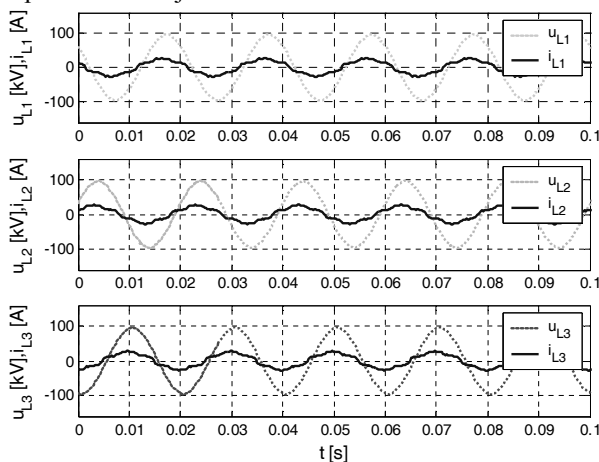
Slika 1: Del omrežja z nelinearnim bremenom
Figure 1: Part of the network with a nonlinear load

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati meritev. Opravljene so bile sočasno v točkah M1, M2 in M3, ki so označene na sliki 1. V točki M1 so bili izmerjeni linijski toki in napetosti na 110 kV strani

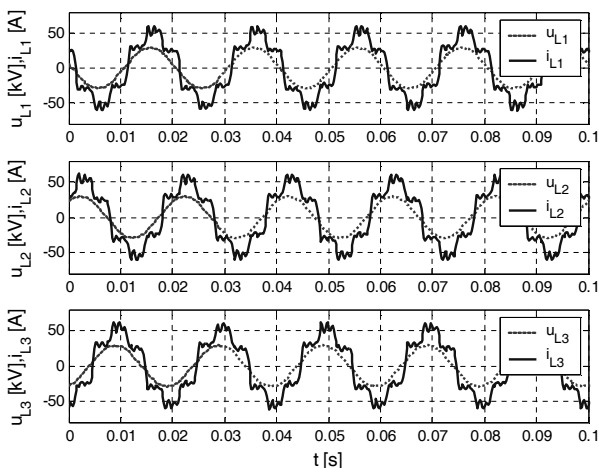
transformatorja, v točki M2 smo izmerili linijske napetosti zbiralk 35 kV in v točki M3 linijske toke usmerniške naprave.

2.1. REZULTATI MERITEV

Časovni potek linijskih napetosti in tokov na 110 kV nivoju prikazuje slika 2. Slika 3 prikazuje časovne poteke linijskih tokov na izvodu DV1 in napetosti na sistemu zbiralk 35 kV, ki so bili izmerjeni v točki M2 in M3. Razvidno je, da je tok na 35 kV nivoju močno harmonsko popačen, medtem ko prisotnost harmonikov v napetosti ni posebej izrazita na nobenem od obeh napetostnih nivojev.



Slika 2: Časovni poteki linijskih tokov in napetosti posneti na 110 kV nivoju
Figure 2: Line currents and voltages measured in a 110 kV network



Slika 3: Časovni poteki linijskih tokov in napetosti, posneti na 35 kV nivoju

Figure 3: Line currents and voltages measured in a 35 kV network

2.2. HARMONSKA ANALIZA IZMERJENIH VELIČIN

Harmonske vsebine izmerjenih tokov in napetosti določimo s harmonsko analizo. Frekvenca vzorčenja izmerjenih signalov znaša 5 kHz. Harmonsko analizo omejimo na petindvajset harmonikov, torej na frekvenco 1250 Hz. Frekvenčno analizo izmerjenih signalov opravimo v MATLABU s pomočjo izračuna Fourierjevih koeficientov a_0 , a_h , in b_h , kjer indeks h predstavlja red harmonika. Fourierjeve koeficiente izračunamo z enačbami (1), (2) in (3).

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(\tau) d\tau \quad (1)$$

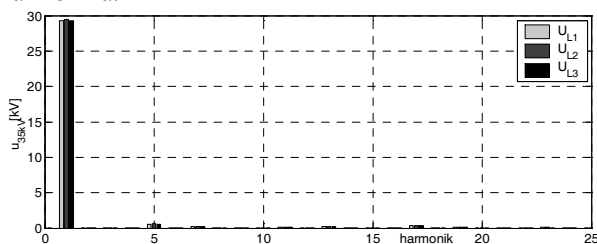
$$a_h = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(\tau) \cdot \cos(h\omega\tau) d\tau \quad (2)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(\tau) \cdot \sin(h\omega\tau) d\tau \quad (3)$$

Pri tem $f(\tau)$ označuje izmerjene vrednosti tokov $i(t)$ in napetosti $u(t)$. Amplitudo posamezne harmonske komponente A_h izračunamo z izrazom (4).

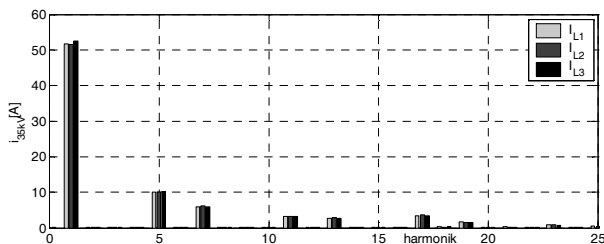
$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (4)$$

Ker nas v nadaljevanju zanimajo predvsem razmere na 35 kV nivoju, so na slikah 4 in 5 prikazani rezultati harmonske analize napetosti in tokov na tem nivoju. Amplitudni spektri napetosti posameznih faz so podani na sliki 4. Razvidna je prisotnost višjih harmonikov, vendar v sorazmerno majhnem odstotku. Napetosti vsebujejo 1,9% petega harmonika, 0,8% sedmega harmonika, 0,6% enajstega harmonika, 0,7% trinajstega, 1,2% sedemnajstega harmonika in 0,5% devetnajstega harmonika.



Slika 4: Amplitudni spektri napetosti na 35 kV nivoju
Figure 4: Amplitude spectra of line voltages on a 35 kV level

Popolnoma drugačne razmere dobimo, ko izvedemo harmonsko analizo tokov na 35 kV nivoju. Amplitudne spektre tokov kaže slika 5. Iz nje je razvidno, da so vrednosti višjih harmonikov v toku zelo visoke. V toku je približno 20% petega harmonika, okrog 12% sedmega harmonika, 6% enajstega harmonika, 5% trinajstega harmonika, 7% sedemnajstega in okrog 3% devetnajstega harmonika.



Slika 5: Amplitudni spektri tokov na 35 kV nivoju
Figure 5: Amplitude spectra of line currents on a 35 kV level

3. Ortogonalna dekompozicija toka v trifaznem sistemu

V nadaljevanju so podane enačbe, s pomočjo katerih je izveden izračun prenosa energije prek daljnovega DV1 do nelinearnega bremena. Uporabljena je metoda ortogonalne razstavitve tokov. Pri tem se tok razstavi na komponento, ki je v fazi z vektorjem napetosti, in na komponento, ki je ortogonalna na vektor napetosti. Ortogonalna razstavitev tokov [1] je izvedena za trifazni sistem linijskih tokov $i_{L1}(t)$, $i_{L2}(t)$, $i_{L3}(t)$ in napetosti $u_{L1}(t)$, $u_{L2}(t)$, $u_{L3}(t)$, ki so bili izmerjeni na 35 kV nivoju (slika 3). Slednje obravnavamo kot zvezne funkcije časa, definirane na izbranem intervalu [1].

Moč $p_k(t)$ faze k v trenutku t je na splošno definirana kot odvod energije $W_k(t)$ po času (5).

$$p_k(t) = \frac{dW_k(t)}{dt} \quad (5)$$

Trenutna moč $p_k(t)$ faze k je enaka produktu trenutne vrednosti napetosti $u_k(t)$ in toka $i_k(t)$ (6).

$$p_k(t) = i_k(t) u_k(t) \quad (6)$$

Efektivna vrednost toka faze k na časovnem intervalu $[t-T, t]$ je podana z izrazom (7), efektivna vrednost napetosti pa z izrazom (8).

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i_k(\tau) i_k(\tau) d\tau} \quad (7)$$

$$U_k = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t u_k(\tau) u_k(\tau) d\tau} \quad (8)$$

Kadar se električne veličine periodično ponavljajo s periodo T , je smiselno definirati povprečno moč v periodi. Povprečno moč $P_k(t)$ faze k določimo z (9).

$$P_k = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u_k(\tau) i_k(\tau) d\tau = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p_k(\tau) d\tau \quad (9)$$

Če izraz (9) uredimo, dobimo izraz (10), ki pove, da je povprečna moč P_k posamezne faze k enaka spremembi energije v časovnem intervalu periode T .

$$P_k = \frac{1}{T} \int_{W_k(t-T)}^{W_k(t)} dW_k(t) = \frac{W_k(t) - W_k(t-T)}{T} \quad (10)$$

Če definiramo vektorja toka $\mathbf{i}(t)$ in napetosti $\mathbf{u}(t)$ z (11), lahko njuni normi oziroma efektivni vrednosti I in U določimo z (12) in (13) s pomočjo efektivnih vrednosti tokov in napetosti posameznih faz (7) in (8).

$$\mathbf{i}(t) = \begin{bmatrix} i_{11}(t) \\ i_{12}(t) \\ i_{13}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_{11}(t) \\ u_{12}(t) \\ u_{13}(t) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \mathbf{i}^T(\tau) \mathbf{i}(\tau) d\tau} = \sqrt{\sum_{k=L1}^{L3} I_k^2} \quad (12)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \mathbf{u}^T(\tau) \mathbf{u}(\tau) d\tau} = \sqrt{\sum_{k=L1}^{L3} U_k^2} \quad (13)$$

Trenutno moč trifaznega sistema določimo s (14), povprečno moč pa s (15).

$$p(t) = \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) = \sum_{k=L1}^{L3} p_k(t) \quad (14)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \mathbf{u}^T(\tau) \mathbf{i}(\tau) d\tau = \sum_{k=L1}^{L3} P_k \quad (15)$$

Pri ortogonalni razstavitvi vektorja toka si pomagamo z ekvivalentno prevodnostjo trifaznega sistema G_e (16).

$$G_e = \frac{P}{U^2} \quad (16)$$

S (17) uvedemo komponento vektorja toka $\mathbf{i}_u(t)$, ki je v smeri napetosti $\mathbf{u}(t)$, z (18) pa komponento vektorja toka $\mathbf{i}_{uo}(t)$ (18), ki je ortogonalna na vektor napetosti.

$$\mathbf{i}_u(t) = G_e \mathbf{u}(t) = \frac{P}{U^2} \mathbf{u}(t) \quad (17)$$

$$\mathbf{i}_{uo}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_u(t) \quad (18)$$

Trenutne vrednosti moči trifaznega sistema so definirane z (19), kjer je $p(t)$ trenutna delovna moč, $p_s(t)$ trenutna navidezna moč in $p_q(t)$ trenutna jalova moč.

$$\begin{aligned} p_s(t) &= \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) \\ p(t) &= \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_u(t) \\ p_q(t) &= \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_{uo}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

Integrali moči v danem časovnem intervalu so enake prirastom energij v tem časovnem oknu (20).

$$\begin{aligned} W_s &= \int_{t-T}^t p_s(\tau) d\tau \\ W &= \int_{t-T}^t p(\tau) d\tau \\ W_q &= \int_{t-T}^t p_q(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (20)$$

Trenutno vrednost joulskih izgub $p_{si}(t)$, ki nastanejo zaradi ohmskih upornosti na vodih (21), razdelimo na izgube $p_i(t)$, ki jih povzroča komponenta vektorja toka $\mathbf{i}_u(t)$ v smeri napetosti $\mathbf{u}(t)$ in so podane z (22), ter na izgube $p_{qi}(t)$, ki jih povzroča komponenta vektorja toka $\mathbf{i}_{uo}(t)$, ki je na vektor napetosti $\mathbf{u}(t)$ ortogonalna, in so podane s (23). Fizikalno gledano, k usmerjenemu prenosu energije pripomore le $\mathbf{i}_u(t)$, $\mathbf{i}_{uo}(t)$ pa pri usmerjenem prenosu energije ne sodeluje. Ker povzroča na vodu dodatne izgube, ki niso nujno potrebne za usmerjen prenos energije, ga je smiselno minimizirati.

$$p_{si}(t) = R \mathbf{i}^T(t) \mathbf{i}(t) \quad (21)$$

$$p_i(t) = R \mathbf{i}_u^T(t) \mathbf{i}_u(t) \quad (22)$$

$$p_{qi}(t) = R \mathbf{i}_{uo}^T(t) \mathbf{i}_{uo}(t) \quad (23)$$

Pri tem je R ohmska upornost voda, za vsak trenutek posebej pa računamo produkte $\mathbf{i}^T(t) \mathbf{i}(t)$. Integrali izgub, podani s (24), (25) in (26) pomenijo energijo, ki se v ireverzibilnem procesu pretvori v toploto na ohmskih upornostih v sistemu. Pri tem so začetne vrednosti energij v trenutku začetka opazovanja $t-T$ upoštevane z vrednostjo nič.

$$W = \int_{t-T}^t p_{si}(\tau) d\tau = \int_{t-T}^t R \mathbf{i}^T(\tau) \mathbf{i}(\tau) d\tau \quad (24)$$

$$W_i = \int_{t-T}^t p_i(\tau) d\tau = \int_{t-T}^t R \mathbf{i}_u^T(\tau) \mathbf{i}_u(\tau) d\tau \quad (25)$$

$$W_{qi} = \int_{t-T}^t p_{qi}(\tau) d\tau = \int_{t-T}^t R \mathbf{i}_{uo}^T(\tau) \mathbf{i}_{uo}(\tau) d\tau \quad (26)$$

Povprečne izgube moči lahko izračunamo tudi s pomočjo kvadrata norm posameznih komponent toka s (27), (28) in (29).

$$P_{si} = R \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \mathbf{i}^T(\tau) \mathbf{i}(\tau) d\tau} \right)^2 \quad (27)$$

$$P_i = R \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \mathbf{i}_u^T(\tau) \mathbf{i}_u(\tau) d\tau} \right)^2 \quad (28)$$

$$P_{qi} = R \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \mathbf{i}_{uo}^T(\tau) \mathbf{i}_{uo}(\tau) d\tau} \right)^2 \quad (29)$$

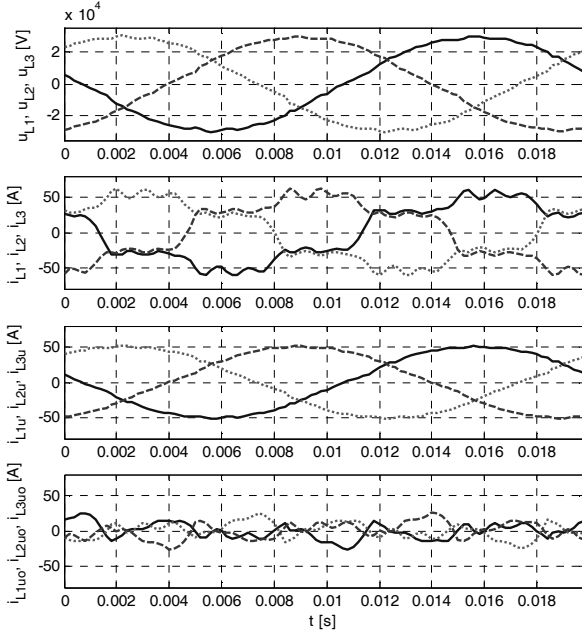
4. Rezultati analize

V nadaljevanju so podani rezultati analize izmerjenih vrednosti s slike 3 za eno periodo $T=0,02$ s. Efektivne vrednosti tokov in napetosti, izračunane s (7) in (8) so:

$I_{L1}=36,64\text{A}$, $I_{L2}=36,48\text{A}$, $I_{L3}=37,23\text{A}$ in $U_{L1}=20,69\text{kV}$, $U_{L2}=20,80\text{kV}$, $U_{L3}=20,57\text{kV}$. Povprečne vrednosti moči posameznih faz (15) so: $P_{L1}=742\text{kW}$, $P_{L2}=749\text{kW}$ in

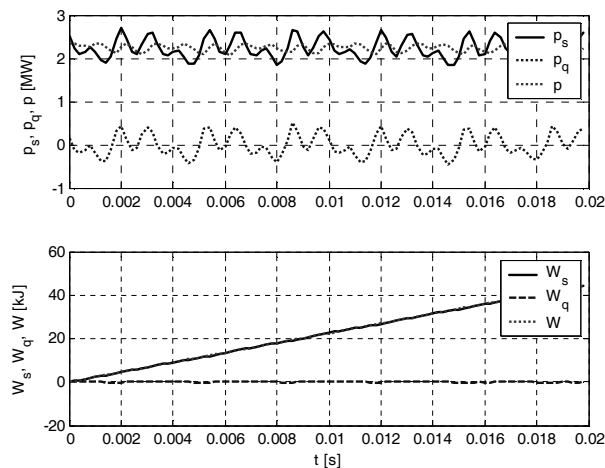
$P_{L3} = 751\text{kW}$, skupna moč trifaznega sistema pa je $2,242\text{MW}$.

Slika 6 kaže časovne potoke linijskih napetosti u_{L1}, u_{L2}, u_{L3} (vektor $\mathbf{u}(t)$), linijskih tokov i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} (vektor $\mathbf{i}(t)$) in komponente vektorjev $\mathbf{i}_u(t)$ in $\mathbf{i}_{uo}(t)$ v posameznih fazah, ki so označene z $i_{L1u}, i_{L2u}, i_{L3u}$ in $i_{L1uo}, i_{L2uo}, i_{L3uo}$.



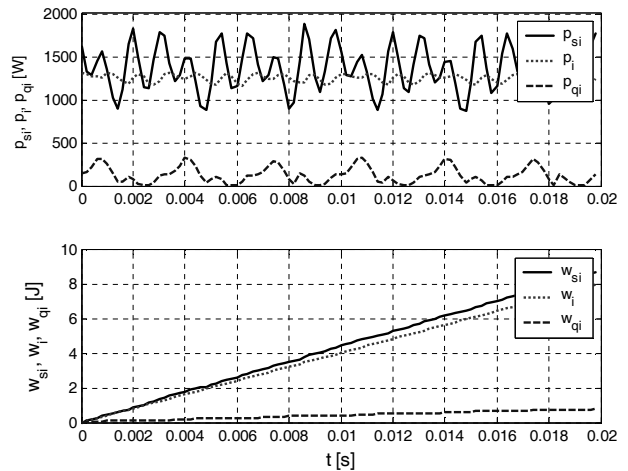
Slika 6: Komponente vektorjev $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{i}(t)$, $\mathbf{i}_u(t)$ in $\mathbf{i}_{uo}(t)$ v posameznih fazah
Figure 6: Components of vectors $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{i}(t)$, $\mathbf{i}_u(t)$ in $\mathbf{i}_{uo}(t)$

Slika 7 kaže trenutne moči (19) in pripadajoče integrale moči (20). Integral trenutne moči $p(t)$ predstavlja usmerjen prenos energije od zbiralk 35 kV k bremenu (slika 1), integral trenutne moči $p_q(t)$ pa recipročno pretakanje energije med zbiralkami 35 kV in bremenom, katerega srednja vrednost je, kot je razvidno iz slike 7, enaka nič.



Slika 7: Trenutne moči in pripadajoče energije
Figure 7: Instantaneous powers and corresponding energies

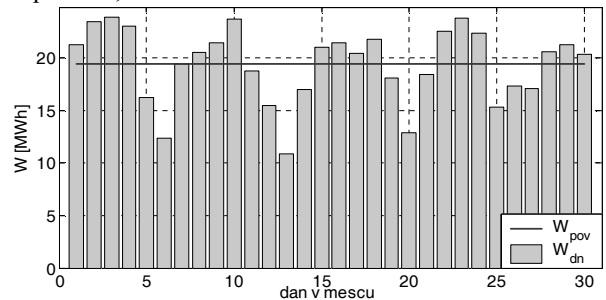
Poglavitna prednost ortogonalne dekompozicije toka je takojšnja ločitev izgub na delež, ki se mu ne moremo izogniti in ga povzroča komponenta $\mathbf{i}_u(t)$, ter delež, ki ga povzroča komponenta $\mathbf{i}_{uo}(t)$ in ga lahko preprečimo na primer z aktivno kompenzacijo. Slika 8 kaže trenutne vrednosti moči (enačbe (23) do (25)) in izgub energije (enačbe (26) do (28)) na ohmskih upornostih prenosnega voda med zbiralkami 35 kV in bremenom. Pri tem sta s p_i in W_i označeni izgubna moč in energija povezani z usmerjenim pretokom energije, ki se jim ni mogoče izogniti, s p_{qi} in W_{qi} pa izgubna moč in energija, povezani z recipročnim pretakanjem energije. Slednji po nepotrebnem povzročata dodatne izgube.



Slika 8: Izgube moči in energije na prenosnemvodu
Figure 8: Power and energy losses in a transmission line

Povprečne vrednosti izgub moči, določene s (27) do (29), znašajo: $P_{si} = 1371,4\text{ W}$, $P_i = 1250,7\text{ W}$, $P_{qi} = 120,7\text{ W}$.

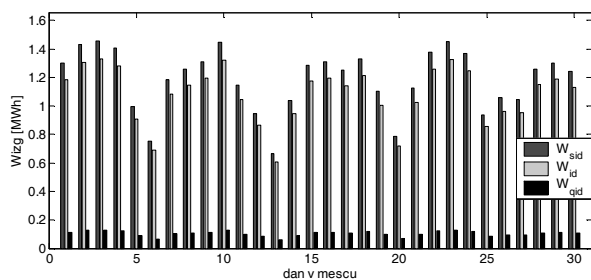
Predhodni izračuni so bili izvedeni za izmerjene vrednosti tokov in napetosti v danem trenutku. Za približno oceno izgub na mesec uporabimo naslednji pristop. Pridobimo podatke o dejanski porabljeni energiji W_{dn} na dan, ki jih prikazuje histogram na sliki 9. Povprečna poraba energije na sliki 9 znaša $W_{pov} = 19,4\text{ MWh/dan}$.



Slika 9: Izmerjeni podatki dnevnega prenosa energije
Figure 9: Measured daily energy transmission

Iz izračunanih vrednosti izgub za obravnavano meritev določimo faktorje izgub relativno glede na izračunano moč trifaznega sistema. Ti faktorji v odstotkih na

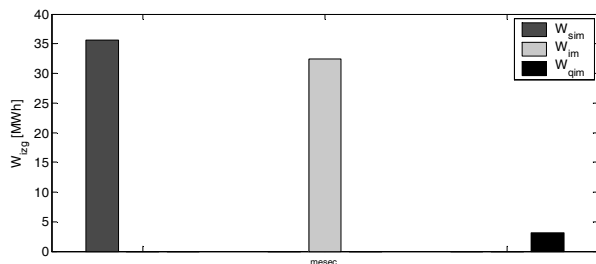
celotno moč znašajo za celotne izgube 0,0612%, faktor izgube zaradi toka i_u znaša 0,0558% in faktor izgube zaradi toka i_{uo} znaša 0,0054%. Če s temi faktorji utežimo dejansko preneseno energijo iz histograma na sliki 9, dobimo izgube energije po posameznih dnevih, ki jih kaže slika 10. Pri tem so W_{sid} skupne dnevne joulske izgube energije na vodu, W_{id} je dnevni delež izgub, ki jih povzroča komponenta toka i_u , W_{qid} pa dnevne izgube, ki jih povzroča komponenta toka i_{uo} .



Slika 10: Diagram dnevni izgub energije na vodu

Figure 10: Daily energy losses in a transmission line

Slika 11 kaže mesečne izgube energije, ki jih določimo z vsoto dnevni izgub s slike 10.



Slika 11: Diagram mesečnih izgub energije na vodu

Figure 11: Monthly energy losses in a transmission line

Celotne joulske izgube W_{sim} znašajo 35,59 MWh/mesec. Od tega se ne moremo izogniti izgubam W_{im} , ki so povezane z usmerjenim pretokom energije in znašajo 32,45 MWh/mesec. Izgubam W_{qim} pa se je mogoče izogniti, saj niso posledica usmerjenega prenosa energije. Te izgube znašajo 3,14 MWh/mesec.

5. Sklep

Kadar imamo opravka s toki in napetostmi, ki vsebujejo le osnovne harmonske komponente, lahko obravnavamo usmerjen prenos energije in recipročno izmenjavo energije med virom in porabniki s pomočjo koncepta delovne in jalove moči ter simbolične metode. V tem primeru so z delovnim tokom preprosto definirane neizogibne joulske izgube, ki zaradi toka nastopijo pri prenosu energije. Razmere se spremenijo, ko imamo opravka s toki in napetostmi, ki vsebujejo tudi višje harmonske komponente. V tem primeru je uporaben opisani način ortogonalne razstavitve tokov. Njegova

največja prednost je direktna določitev komponente toka, ki ne pripomore k usmerjenemu prenosu energije, pač pa po nepotrebnem povečuje joulske izgube.

6. Literatura

- [1] Gorazd Štumberger, Drago Dolinar, Ferdinand Gubina, Bojan Grčar, *Ortogonalne razstavitve tokov in definicije moči v trifaznih sistemih*, *Elektrotehniški Vestnik*, 1997, letnik 64, št. 5, str 288-295.
- [2] Gorazd Štumberger, *Prenos električne energije v primerih, ko toki in napetosti ne vsebujejo zgolj osnovnih harmonskih komponent*, CIGRE ŠK C4-2, 2005.

Miran Rošer je diplomiral leta 2003 na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Mariboru, kjer tudi nadaljuje izobraževanje s podiplomskim študijem. Zaposlen je na Elektro Celje, d.d., kjer se ukvarja z meritvami in rejljimi zaščitnimi sistemi.

Gorazd Štumberger je diplomiral leta 1989, magistriral leta 1992 in doktoriral leta 1996 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je trenutno zaposlen kot izredni profesor. Ukvarja se z modeliranjem, vodenjem in zaščito elektromehanskih sistemov in elementov elektroenergetskega sistema. Dr. Gorazd Štumberger je član združenj SlokoCIGRE, COMPUMAG in IEEE.