

Harmonici u pogonskim sistemima I deo

Uvod

- Poslednjih 30-tak godina beleži značajan porast interesovanja za **oblast kvaliteta električne energije** iz sledećih razloga [1]:

- povećana osjetljivost opreme,
- povećana svest potrošača o kvalitetu el. energije,
- povećanje troškova električne energije na globalnom nivou,
- povećana upotreba uređaja energetke elektronike u cilju osvarenja ušteda električne energije,
- smanjenje gubitaka snage,
- bolje iskorišćenje isporučene el. energije od strane distributivnih preduzeća,
- smanjenje zagađenja životne sredine, kao što je ometanje rada telekomunikacionih uređaja, kao i zaštitnih uređaja.

-Problem kvaliteta el. energije utiče na potrošače ekonomski u smislu povećanih gubitaka snage, otkaza opreme, kvara, prekida proizvodnog procesa i gubitaka u proizvodnji, zbog čega su razvijeni novi standardi i nova merna oprema - da bi se održavao kvalitet el. energije na propisanom nivou.

Uvod

- Mnogobrojni uzroci zagađenja u sistemima snabdevanja el. energijom iz naizmeničnih izvora se mogu podeliti na dva osnovna [1]:
 - prirodni - velika el. pražnjenja kao što je udar groma, otkaz opreme i kvarovi (oko 60%)
 - Izazvani - naponska izobličenja i propadi napona (oko 40%).
- Takođe, mnogobrojni potrošači zagađuju elektroenergetsku mrežu izobličavajući mrežnu struju i na taj način se ponašaju kao nelinearni potrošači.
- Kvalitet el. energije se kvantitativno iskazuje kao odstupanje mrežnog napona, struje ili frekvencije od propisanih vrednosti, koje može izazvati nepravilan rad ili otkazivanje opreme na potrošačkoj strani.
- Tipični problemi vezani za kvalitet el. energije koji se odnose na napon na mestu zajedničkog priključenja (PCC – Point of Common Coupling) različitih potrošača su:
 - naponski harmonici,
 - tranzijentni prenaponi,
 - porast napona, propad napona, prekid napona,
 - nesimetrija,
 - fluktuacije,
 - flikeri, udarna struja itd.

Uvod

-Ovi problemi se javljaju u mreži zbog različitih poremećaja u sistemu ili zbog različitih nelinearnih potrošača kao što su elektrolučne peći, sistemi za besprekidno napajanje (UPS) i regulisani elektromotorni pogoni (ASD, VSD) .

-Neki od problema u vezi kvaliteta el. energije koji se javljaju kao posledica izobličene mrežne struje su loš faktor snage, porast neaktivnog opterećenja, strujni harmonici, nesimetrične struje, kao i prekomerna struja u neutralnom provodniku u višefaznom sistemu izazvana radom nelinearnih potrošača.

-Svi ovi problemi koji se odnose na kvalitet el. energije mogu da prouzrokuju kvar na kondenzatorskim baterijama, povećane gubitke u distributivnoj mreži i u el. mašinama, buku, vibracije, prenapone i prekomerne struje usled rezonancije, inverzne komponente struja u generatorima i motorima, posebno zagrevanje rotora, propadanje kablova, dielektrika, interferencije sa komunikacionim sistemima, ometanje signala i neispravnost u radu releja i prekidača, pogrešno merenje, ometanje rada upravljačkog dela el.mot. pogona i drugo.

Uvod

- Većina električnih potrošača ima nelinearno ponašanje na mestu priključenja na mrežu. Oni izazivaju više harmonike u mrežnoj struji kao što su karakteristični harmonici, interharmonici, subharmonici, zatim, reaktivnu komponentu struje, fluktuacije struje, strujnu nesimetriju i sl. Većina obrtnih el. mašina, kao i transformatori, prigušnice i drugi potrošači sa magnetnim materijalom, ponašaju se kao nelinearni potrošači usled pojave zasićenja magnetnih kola, postojanja zubaca i žlebova, različite raspodele namotaja, nesimetrije vazdušnog zazora i dr [1].
- Mnogi potrošači koji imaju promenljivu potrošnju, kao što su elektrolučne peći i uređaji koji rade intermitentno, takođe se ponašaju kao nelinearni potrošači. Čak i kondenzatorske baterije mogu da se ponašaju kao nelinearni potrošači kada uđu u rezonancu sa magnetnim komponentama u sistemu.
- Sve veća upotreba uređaja energetske elektronike u naizmeničnoj mreži, koji se sastoje od dioda, tranzistora, tiristora i ostalih poluprovodničkih prekidača, a koji se koriste za napajanje raznih potrošača, kao što su svetiljke sa elektronskim balastom, regulisani grejni uređaji, punjači baterija, ventilatori, kompjuteri, štampači, televizori, napojna jedinica za računar, elektrolučne peći, elektrohemijski procesi, regulisani pogoni u električnoj vuči, uređaji za klimatizaciju, pumpe, postrojenja za prečišćavanje vode, liftovi, konvejeri, kranovi i dr. narušavaju propisani kvalitet električne energije.
- U trofaznim sistemima oni mogu da izazovu nesimetriju i samim tim porast struje u neutralnom provodniku u četvorožičnim sistemima, posebno u slučaju distribuiranih monofaznih nelinearnih potrošača.

Sadržaj

- Osnovni pojmovi, linearna opterećenja, Furijeova transformacija
- Nelinearna opterećenja i faktor snage
- Prividna snaga – osnovni harmonik
- Ukupna prividna snaga –viši harmonici
- Poređenje prividnih snaga
- Definisavanje snage distorzije
- Protok električne energije u sistemima koji sadrže nesinusne talasne oblike

Sadržaj

- Srednja snaga
- Srednja vrednost trigonometrijskih funkcija i srednja vrednost proizvoda trigonometrijskih funkcija
- Srednja snaga – za osnovni harmonik
- Efektivna vrednost talasnog oblika napona
- Efektivna vrednost talasnog oblika struje

Sadržaj

- Definicija faktora snage preko viših harmonika napona i struje
- Faktor izobličenja – Distortion factor
- Ukupno harmonijsko izobličenje struje (TDH_I)
- Ukupno harmonijsko izobličenje napona (TDH_V)
- Upotreba kondenzatora za kompenzaciju reaktivne energije
- Pojava rezonanse u mreži pri kompenzaciji Q

Linearna opterećenja

- U slučaju da se npr. sijalica (inkandescentna svetiljka) ili grejalica, kao primer čisto otpornog linearnog opterećenja, priključi na prostoperiodični izvor napona, ona će imati prostoperiodični talasni oblik struje u fazi sa naponom izvora, a snaga koja se disipira na svetiljci, ili grejalici će biti $P = UI$
- U slučaju reaktivnog linearnog opterećenja kao što je asinhroni motor, fazni pomeraj između napona i struje u motornom režimu rada je manji od 90° , a faktor snage ima pozitivnu vrednost manju od 1, $0 < \cos \varphi < 1$
- U slučaju kapacitivnog linearnog opterećenja fazni pomeraj između napona i struje je veći od 90° , a faktor snage ima negativnu vrednost manju od 1, $-1 < \cos \varphi < 0$, kao i u generatorskom režimu rada asinhronog motora

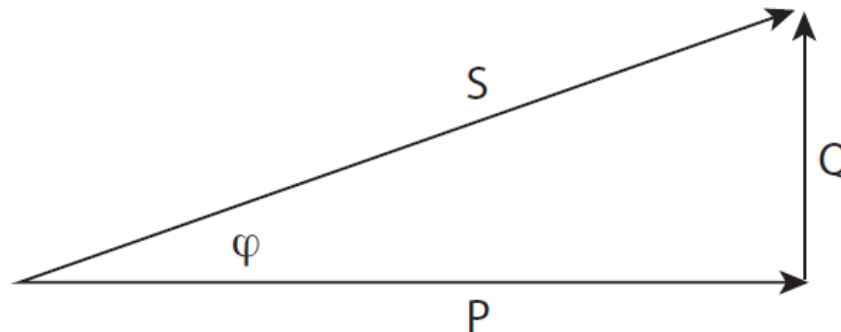
Linearna opterećenja

- U slučaju linearnih opterećenja, snaga preuzeta iz naizmeničnog izvora ima tri komponente:
 1. prividnu S [VA],
 2. aktivnu P [W] i
 3. reaktivnu Q [VAR].
- U slučaju savršenih (čistih) prostoperiodičnih talasnih oblika napona i struje, P , Q i S se mogu prikazati preko vektora koji formiraju trougao:

$$\vec{S} = \vec{U} \times \vec{I}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

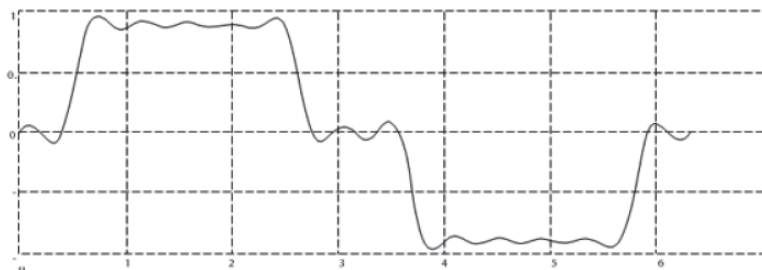
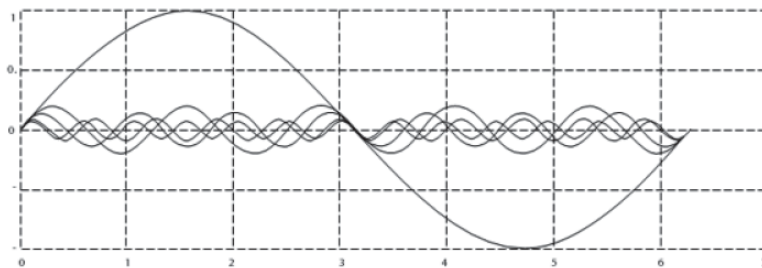
$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$



$\cos \varphi$ ili DPF (displacement power factor)

Nelinearna opterećenja

- Nelinearna opterećenja kao što su diodni ispravljači, kada se priključe na prostoperiodični izvor napona, neće imati prostoperiodičan (sinusoidalni) talasni oblik struje na mestu priključenja na izvor (prouzrokuje izobličenje mrežne struje).
- Nesinusoidalni talasni oblik se može prikazati kao suma sinusoidalnih talasa, koji imaju periode jednake celobrojnom umnošku periode talasa osnovnog harmonika: $f(t) = \sum a_h \sin(h \cdot \omega_1 t)$



Prikaz dekompozicije struja 6-pulsnog ispravljača na trofaznoj mreži preko prostoperiodičnih talasnih oblika [2]

Nelinearna opterećenja prema IEEE Std 1459TM-2010

(Revision of IEEE Std 1459-2000)

IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions

-Nelinearna opterećenja se mogu podeliti u dve osnovne grupe [3]:

1. Uređaji energetske elektronike
 - Energetski pretvarači, frekventni pretvarači, upravljačke jedinice za JS motore, ciklokonvertori, kranovi, elevatori, valjački stanovi, UPS-ovi, svičerska napajanja, punjači baterija, invertori
2. Uređaji sa električnim lukom
 - fluorescentne svetiljke, lučne peći i mašine za zavarivanje

- U trenutku donošenja ovog standarda nije postojala opšte prihvaćena teorija, koja je mogla istovremeno da postavi zajedničke osnove za [3] :

- obračun utrošene električne energije
- evaluaciju kvaliteta električne energije
- detekciju glavnih izvora distorzije talasnih oblika struje i napona
- teorijski pristup proračunu opreme za ublažavanje viših harmonika, kao što su aktivni filteri ili aktivni kompenzatori

Najčešće korišćeni standardi u ovoj oblasti su:

IEC/EN 61000-3-2, Limits for harmonic current emissions ($\leq 16A$ per phase)

- IEC/EN 61000-3-12, Limits for harmonic currents ($>16A$ and $\leq 75A$)
- IEC/EN 61000-3-4, Limitation of emission of harmonic currents ($> 16A$)
- IEC/EN 61000-2-2 and IEC/EN 61000-2-4 Compatibility levels for low frequency conducted disturbances
- **IEEE519, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems**
- G5/4, Engineering recommendation, planning levels for harmonic voltage distortion and the connection of nonlinear equipment to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom

U Srbiji:

- SRPS EN 50160, Jun 2012, identičan sa EN 50160:2010+ Corrigendum December 2010, Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža
- SRPS EN 50160 Jun 2012, Izmena 1 Maj 2015, Identičan sa EN 50160:2010/A1:2015, Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža – Izmena 1

Trofazni sistem – osnovne veličine

-Naponski i strujni harmonici koji nastaju od nelinearnih opterećenja povećavaju gubitke snage i zbog toga imaju negativan uticaj na električne komponente i uređaje .

-Razmatra se trofazni sistem i polazi se od osnovnih veličina:

$$v_a = \sqrt{2}V_{ae} \sin(\omega t - \theta_a)$$

$$i_a = \sqrt{2}I_{ae} \sin(\omega t - \theta_a - \psi_a)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_{be} \sin(\omega t - \theta_a - 120^\circ)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_{be} \sin(\omega t - \theta_a - \psi_a - 120^\circ)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_{ce} \sin(\omega t - \theta_a - 240^\circ)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_{ce} \sin(\omega t - \theta_a - \psi_a - 240^\circ)$$

$$V = \sqrt{2} \cdot V_e$$

V Maksimalna vrednost talasnog oblika napona

V_e Efektivna vrednost talasnog oblika napona

$$I = \sqrt{2} \cdot I_e$$

I Maksimalna vrednost talasnog oblika struje

I_e Efektivna vrednost talasnog oblika struje

θ_a Ugaoni pomeraj vektora napona u odnosu na referentnu osu u $t=0$

ψ_a Ugaoni pomeraj vektora struje u odnosu na referentnu osu u $t=0$

Furijeova transformacija

- Po definiciji, funkcija $f(t)$ je periodična, ako važi $f(t) = f(t+T)$. Ovakva funkcija se može predstaviti trigonometrijskim nizom elemenata, koji se sastoji od jednosmerne komponente i drugih elemenata sa učestanostima koje sadrže osnovnu komponentu i njene celobrojne umnoške [3].
- Furijeova transformacija se može primeniti samo u slučaju da su ispunjeni Dirichlet - ovi uslovi, da:
 - ako je funkcija $f(t)$ diskontinualna, onda mora da ima konačan broj prekida na periodu T .
 - funkcija $f(t)$ ima ograničenu srednju vrednost na periodu T .
 - funkcija $f(t)$ ima konačan broj pozitivnih i negativnih maksimalnih vrednosti.

Tada se svodi na izraz:

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

Gde je: $\omega_0 = 2\pi/T$.

Furijeova transformacija

- Ovaj se izraz dalje može uprostiti i postati:

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h)$$

- Gde je:

$$c_0 = \frac{a_0}{2}, c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, \quad \text{i} \quad \phi_h = \tan^{-1} \left(\frac{a_h}{b_h} \right)$$

- Ovaj izraz je poznat kao Furijeov red i predstavlja periodičnu funkciju koju čine prostoperiodične funkcije različitih učestanosti.

$(h \omega_0)$ - učestanost h – *tog harmonika*

c_0 - vrednost jednosmerne komponente

c_h i ϕ_h - amplituda i fazni ugao h – *tog harmonika*

- Osnovni harmonik : $h = 1$

Furijeova transformacija

- Dalje, poslednji izraz se može predstaviti u kompleksnom obliku:

$$f(t) = \sum_{h=0}^{\infty} c_h e^{jh\omega_0 t}$$

- Gde je: $h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ i

$$c_h = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jh\omega_0 t} dt$$

- Generalno, učestanosti od interesa za harmonijsku analizu su do 40-tog harmonika.

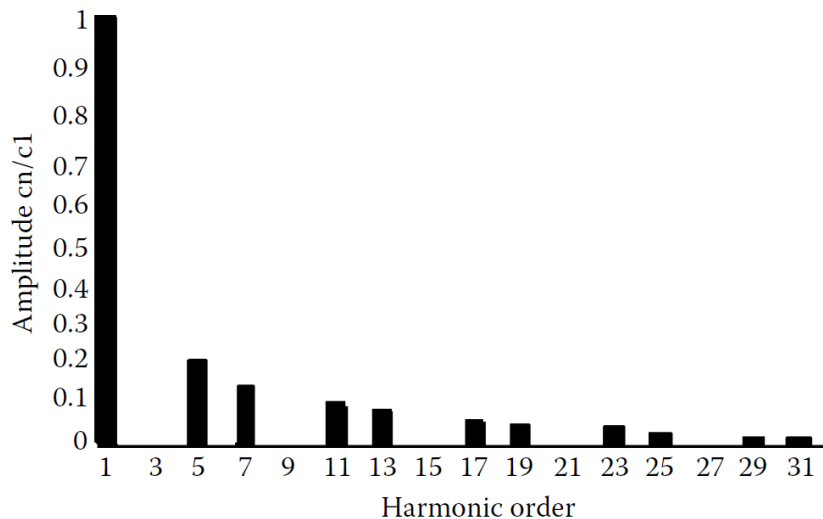
- Glavni izvor harmonika u elektroenergetskim sistemima su statički pretvarači.

U idealnim radnim uslovima, harmonici koje stvara p pulsni energetski pretvarač su:

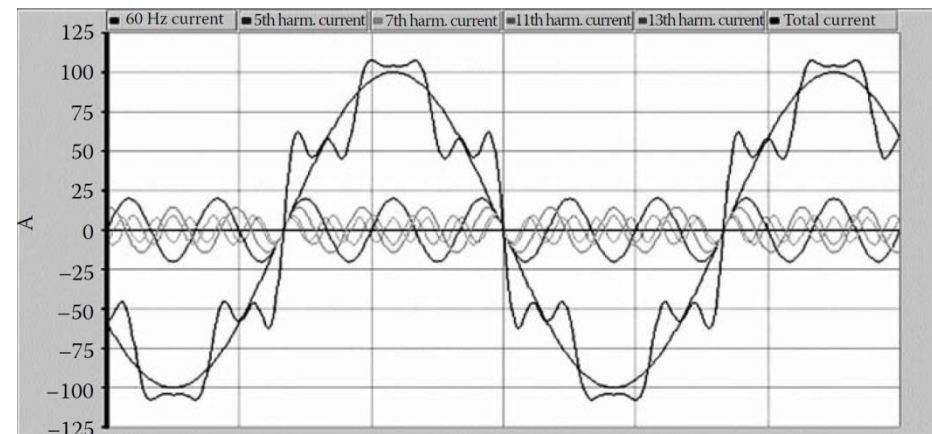
$$I_h = \frac{I_1}{h}, \quad h = pn \pm 1 \quad n = 1, 2, \dots \quad \text{i} \quad p - \text{celobrojni umnožak broja } 6$$

- Stubični dijagram amplituda harmonika koje generiše šestopulsni pretvarač, normalizovanih sa c_1 (amplituda osnovnog harmonika) se zove harmonijski spektar.

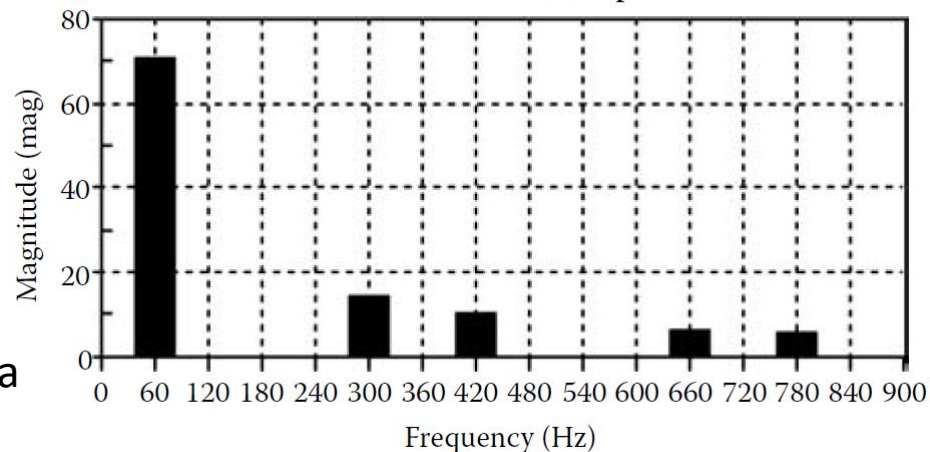
- Važno je napomenuti da opterećenja tipa simetričnih trofaznih ispravljača ne proizvode komponentu trećeg harmonika, niti stvaraju bilo koju harmoničku komponentu deljivu sa 3 (3., 9., 15., 21., itd.).
- U slučaju simetričnog trofaznog sistema, harmonici koji predstavljaju umnožak broja TRI, mogu se blokirati korišćenjem transformatora sa izolovanim zvezdištem ili transformatora sa spregom u trougao (zbir struja je jednak nuli).



Primer harmonijskog spektra
za šestopulsni pretvarač [3]



Total current harmonic spectrum



Razlaganje izobličenog talasa struje [3]

Nekarakteristični harmonici (interharmonici)
se mogu pojaviti u slučaju:

- Nesimetrije ulaznih napona
- Nejednakosti komutacionih reaktansi po fazama
- Nejednakosti "mrtvog vremena" između okidačkih impulsa u pretvaraču

Vrednosti za snage u slučaju napajanja koje nije prostoperiodično

- Trenutne vrednosti napona i struje:

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} F_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h)$$

- Trenutna snaga:

$$p(t) = v(t)i(t)$$

- Efektivne vrednosti napona i struje:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} F_h^2}$$

- Aktivna snaga:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \psi_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h$$

- Reaktivna snaga:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \psi_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h$$

- Prividna snaga:

$$S = V_{rms} I_{rms}$$

Prividna snaga – osnovni harmonik

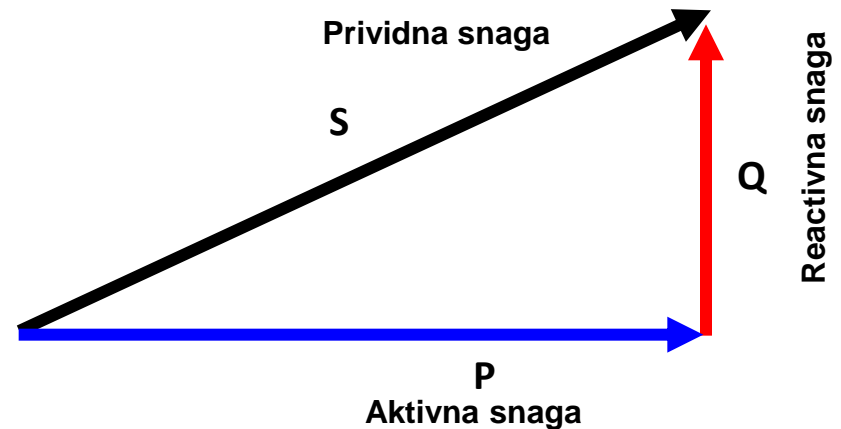
Osnovni harmonik

$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1) = V_{1e} I_{1e} \cos(\theta_1 - \psi_1) = V_{1e} I_{1e} \cos(\varphi_1)$$

$$Q = \frac{V_1 I_1}{2} \sin(\theta_1 - \psi_1) = V_{1e} I_{1e} \sin(\theta_1 - \psi_1) = V_{1e} I_{1e} \sin(\varphi_1)$$

$$S = V_{1e} I_{1e}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



Ukupna prividna snaga – viši harmonici [4]

Viši harmonici

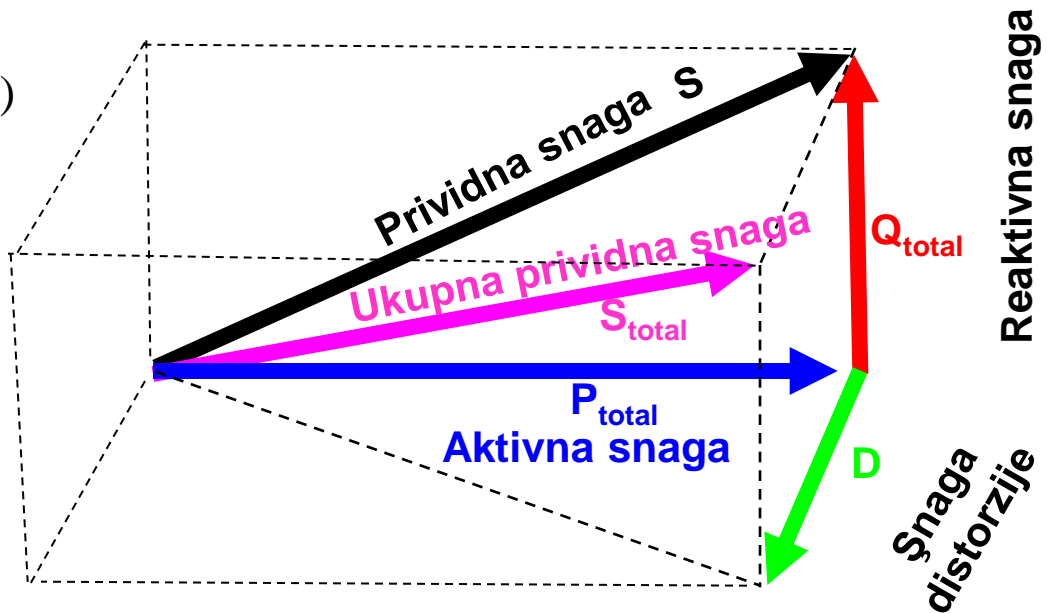
$$P_{total} = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cos(\theta_n - \psi_n)$$

$$Q_{total} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \sin(\theta_n - \psi_n)$$

$$S_{total} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}$$

$$D = \sqrt{S_{total}^2 - P_{total}^2 - Q_{total}^2}$$

$$S_{total} = \sqrt{P_{total}^2 + Q_{total}^2 + D^2}$$



Poređenje prividnih snaga

Osnovni harmonik

S

Prividna snaga



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

S_{total}

Ukupna prividna snaga



$$S_{total} = \sqrt{P_{total}^2 + Q_{total}^2 + D^2}$$

Viši harmonici

$$S_{total} > S$$

Poređenje prividnih snaga

$$P_{total} = V_0 I_0 + \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1) + \frac{V_2 I_2}{2} \cos(\theta_2 - \psi_2) + \frac{V_3 I_3}{2} \cos(\theta_3 - \psi_3) + \dots + \frac{V_n I_n}{2} \cos(\theta_n - \psi_n) \quad P_{total} > P$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$Q_{total} = \frac{V_1 I_1}{2} \sin(\theta_1 - \psi_1) + \frac{V_2 I_2}{2} \sin(\theta_2 - \psi_2) + \frac{V_3 I_3}{2} \sin(\theta_3 - \psi_3) + \dots + \frac{V_n I_n}{2} \sin(\theta_n - \psi_n) \quad Q_{total} > Q$$

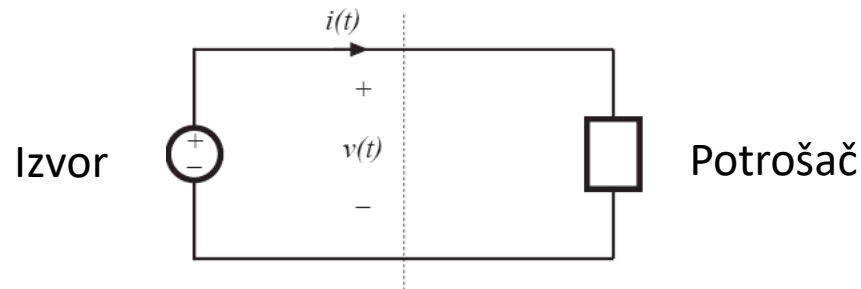
$$S_{total} = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2 \right) \cdot \left(\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2 \right)}$$

$$S = U_{1e} \cdot I_{1e}$$

$$S_{total} > S$$

$$D = \sqrt{S_{total}^2 - P_{total}^2 - Q_{total}^2}$$

Protok električne energije u sistemima koji sadrže nesinusne talasne oblike



Napon i struja u obliku Furijerovog reda:

$$v(t) = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \quad i(t) = I_o + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\omega t - \psi_m)$$

Energija prenetá opterećenju u toku jedne periode:

$$W_{period} = \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt$$

Srednja snaga kojom se prenosi ova energija u toku jedne periode je:

$$P_{sr} = \frac{W_{period}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt$$

Srednja snaga [4]

$$P_{sr} = \frac{W_{period}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt$$

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[V_o + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \right] \left[I_o + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\omega t - \psi_m) \right] dt$$

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T V_o I_o dt + \frac{1}{T} \int_0^T V_o \cdot \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\omega t - \psi_m) dt + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{T} \int_0^T I_o \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \psi_n) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \psi_n) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\omega t - \psi_m) \right] dt$$

Srednja vrednost trigonometrijskih funkcija i srednja vrednost proizvoda trigonometrijskih funkcija

Simetrični talasni oblik u toku jedne periode – srednja vrednost nula

$$\int_0^T \cos(\omega t) dt = 0$$

$$\int_0^T \sin(\omega t) dt = 0$$

U toku celobrojnog umnoška perioda – srednja vrednost nula

$$\int_0^T \cos(n\omega t) dt = 0$$

$$\int_0^T \sin(n\omega t) dt = 0$$

$$\int_0^T \sin(n\omega t) \cdot \cos(m\omega t) dt = 0, \text{ za sve } m \text{ i } n$$

$$\int_0^T \sin(n\omega t) \cdot \sin(m\omega t) dt = \begin{cases} 0 & n \neq m \\ \frac{T}{2} & n = m \end{cases}$$

$$\int_0^T \cos(n\omega t) \cdot \cos(m\omega t) dt = \begin{cases} 0 & n \neq m \\ \frac{T}{2} & n = m \end{cases}$$

Srednja snaga

$$\int_0^T [V_n \cos(n\omega t - \theta_n)] [I_m \cos(m\omega t - \psi_m)] dt = \begin{cases} 0 & n \neq m \\ T \cdot \frac{V_n I_n}{2} \cos(\theta_n - \psi_n) & n = m \end{cases}$$

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 I_0 dt + \frac{1}{T} \int_0^T V_0 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\omega t - \psi_m) dt + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\omega t - \psi_m) \right] dt$$

$n = m$ Uslov prenosa energije

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 I_0 dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \cdot I_n \cos(n\omega t - \psi_n) \right] dt$$

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \cdot T \cdot V_0 I_0 + \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \psi_n) = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cos(\theta_n - \psi_n)$$

Srednja snaga – za osnovni harmonik

Energija se prenosi opterećenju samo kada komponente Furijerovih redova napona $v(t)$ i struje $i(t)$ sadrže članove iste učestanosti. Na primer, ako napon i struja sadrže osnovni harmonik, srednja snaga kojom se prenosi energija opterećenju je:

$$P_{sr} = \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{1e} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1e}}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1) = V_{1e} I_{1e} \cos(\theta_1 - \psi_1)$$

$$V_1 = \sqrt{2} \cdot V_{1e} \quad V_1 \quad \text{Maksimalna vrednost prvog harmonika napona}$$

V_{1e} Efektivna vrednost prvog harmonika napona

$$I_1 = \sqrt{2} \cdot I_{1e} \quad I_1 \quad \text{Maksimalna vrednost prvog harmonika struje}$$

I_{1e} Efektivna vrednost prvog harmonika struje

θ_1 Ugaoni pomeraj prvog harmonika napona

ψ_1 Ugaoni pomeraj prvog harmonika struje

Efektivna vrednost talasnog oblika napona izražena preko Furijeovog reda [4]

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \right]^2 dt}$$

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \right] \cdot \left[V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \right] dt}$$

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_0 \cdot V_0 dt + 2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T V_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \right]^2 dt}$$

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot T \cdot V_0^2 + \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{(\sqrt{2})^2}}$$

$$V_e = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2} = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{en}^2}$$

Efektivna vrednost talasnog oblika struje izražena preko Furijeovog reda [4]

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \psi_n) \right]^2 dt}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \psi_n) \right] \cdot \left[I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \psi_n) \right] dt}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_0 \cdot I_0 dt + 2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \psi_n) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \psi_n) \right]^2 dt}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot T \cdot I_0^2 + \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{(\sqrt{2})^2}}$$

$$I_e = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{en}^2}$$

Definicija faktora snage preko viših harmonika napona i struje

Izrazi za efektivne vrednosti struje i napona su slični

Harmonici povećavaju efektivnu vrednost naizmenične veličine

Povećanje efektivne vrednosti napona i struje znači povećanje gubitaka

Povećanje efektivnih vrednosti ne znači povećanje srednje snage. Proizvod istih harmonijskih komponenti napona i struje doprinosi srednjoj snazi, ali je rezultantna vrednost snage harmonijskih komponenti zanemarljiva u odnosu na aktivnu snagu prvog harmonika.

Za efikasan prenos energije iz izvora do opterećenja, poželjno je da to bude pri maksimalno mogućoj srednjoj snazi, pri čemu je potrebno da su efektivne vrednosti što manje (manji gubici).

Faktor snage predstavlja vrednost mere koliko se efikasno energija prenosi iz izvora ka potrošaču i definiše se kao:

$$\text{faktor snage} = \frac{\text{srednja snaga}}{\text{efektivna vrednost struje} \cdot \text{efektivna vrednost napona}}$$

Linearno otporno opterećenje, sinusni napon

Osnovni harmonik struje u fazi sa osnovnim harmonikom napona

$$\theta_1 = \psi_1, \cos(\theta_1 - \psi_1) = \cos(0) = 1$$

$$V_{1e} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} = \sqrt{\frac{V_1^2}{2}} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} \quad I_{1e} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} = \sqrt{\frac{I_1^2}{2}} = \frac{I_1}{\sqrt{2}}$$

$$P_{sr} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cos(\theta_n - \psi_n) = \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1)$$

$$\cos(\theta_1 - \psi_1) = \frac{P_{sr}}{\frac{V_1 I_1}{2}}$$

Iz formule

Po definiciji

$$\text{faktor snage} = \frac{P_{sr}}{V_{1e} I_{1e}}$$

$$\text{faktor snage} = \frac{P_{sr}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{P_{sr}}{\frac{V_1 I_1}{2}}$$

Faktor snage je

$$\cos(\theta_1 - \psi_1) = \cos \varphi = \frac{P_{sr}}{\frac{V_1 I_1}{2}}$$

Nelinearno dinamičko opterećenje, sinusni napon i viši harmonici struje [4]

Viši harmonici struje povećavaju efektivnu vrednost struje i smanjuju faktor snage.

$$V_e = \frac{V_1}{\sqrt{2}} \quad I_e = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}$$

$$\text{faktor snage} = \frac{P_{sr}}{V_{1e} I_e} = \frac{\frac{V_1 I_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1)}{V_{1e} \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} = \frac{\frac{V_{1e} \sqrt{2} I_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1)}{V_{1e} \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}}$$

$$\text{faktor snage} = \left(\frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \right) \cdot (\cos(\theta_1 - \psi_1))$$

$\theta_1 - \psi_1$
Pomeraj osnovnog harmonika
 struje prema osnovnom harmoniku napona

$$\text{faktor snage} = (\text{faktor izobličenja}) \cdot (\text{faktor pomeraja})$$

(distortion factor) (displacement factor)

Faktor izobličenja –Distortion factor

$$\text{faktor izobličenja} = \left(\frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \right) = \frac{\text{efektivna vrednost struje osnovnog harmonika}}{\text{efektivna vrednost struje svih harmonika}}$$

Ukupno harmonijsko izobličenje struje – Total Harmonic Distortion (THD_I)

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}}{I_{1e}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{I_{1e}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{en}^2}}{I_{1e}}$$

$$THD_I \% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{en}^2}}{I_{1e}} \cdot 100$$

Definisanje faktora snage preko faktora izobličenja, THD_i

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{en}^2}}{I_{1e}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{en}^2}{I_{1e}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{en}^2 - I_{1e}^2}{I_{1e}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{en}^2 - I_{1e}^2}{I_{1e}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{en}^2}{I_{1e}^2} - 1}$$

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{en}^2}{I_{1e}^2} - 1} \quad THD_I^2 + 1 = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{en}^2}{I_{1e}^2} = \frac{I_{ef}^2}{I_{1e}^2} \quad \frac{I_{1e}^2}{I_{ef}^2} = \frac{1}{1 + THD_I^2}$$

$$\text{faktor izobličenja} = \frac{I_{1e}}{I_{ef}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

$$\text{faktor snage} = \left(\text{faktor izobličenja} \right) \cdot \left(\text{faktor pomeraja} \right)$$

$$\text{faktor snage} = \left(\frac{I_{1e}}{I_{ef}} \right) \cdot \left(\cos(\theta_1 - \psi_1) \right) = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot \cos(\varphi_1)$$

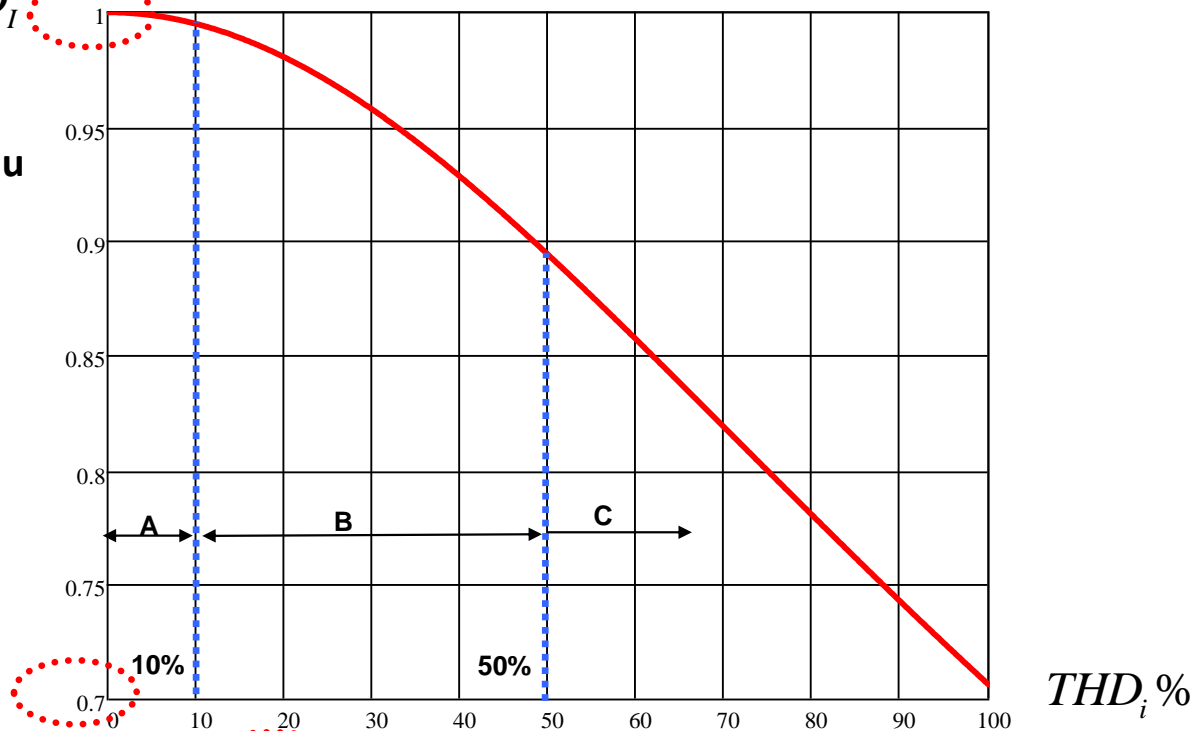
Zavisnost faktora izobličenja od THD_i

$$\frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad \text{faktor izobličenja} = \frac{I_{1e}}{I_{ef}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

A – Nema rizika za opremu

B-Značajna harmonijska izobličenja

C- Visoka harmonijska izobličenja



$$\text{faktor snage} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \cdot \cos(\varphi_1)$$

IEEE-519 current distortion limits for general distribution systems (120–69 000 V)

IEEE-519 – Maksimalna ograničenja neparnih harmonika struje za distributivne sisteme od 120 V do 69 kV

I_{sc}/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD
<20	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%	5.0%
20–50	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%	8.0%
50–100	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%	12.0%
100–1000	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%	15.0%
>1000	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%	20.0%

Parni harmonici su ograničeni na 25% neparnih harmonika iz date tabele.

I_{sc} – Maksimalna struja kratkog spoja u tački priključka na mrežu I_{ks}

I_L - srednja maksimalna zahtevana struja opterećenja za određeni period (godina) $I_{opter.}$

$\frac{I_{sc}}{I_L}$ - Odeđuje “krutost” napajanja. Veća “krutost” napajanja znači veće dozvoljeno izobličenje

Ukupno harmonijsko izobličenje napona – Total Harmonic Distortion (THD_V)

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{en}^2}}{V_{1e}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_{en}^2}{V_{1e}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_{en}^2 - V_{1e}^2}{V_{1e}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_{en}^2}{V_{1e}^2} - 1}$$

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_{en}^2}{V_{1e}^2} - 1} \quad THD_V^2 + 1 = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_{en}^2}{V_{1e}^2} = \frac{V_{ef}^2}{V_{1e}^2} \quad \frac{V_{1e}^2}{V_{ef}^2} = \frac{1}{1 + THD_V^2}$$

$$\text{faktor izobličenja} = \frac{V_{1e}}{V_{ef}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}}$$

Nelinearno dinamičko opterećenje, viši harmonici napona i viši harmonici struje

$$f_{\text{faktor snage}} = \frac{P_{sr}}{V_e I_e} = \frac{\frac{V_1 I_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1)}{\sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} = \frac{\frac{V_1}{\sqrt{2}} \frac{I_1}{\sqrt{2}} \cos(\theta_1 - \psi_1)}{\sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}}$$

$$f_{\text{faktor snage}} = \frac{P_{sr}}{V_e I_e} = \frac{\frac{V_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}}} \frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \cos(\theta_1 - \psi_1)$$

$$f_{\text{faktor snage}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot \cos(\varphi_1)$$

$$f_{\text{faktor snage}} = (\text{faktor izobličenja } V) \cdot (\text{faktor izobličenja } I) \cdot (\text{faktor pomeraja})$$

Zanemarenje THD_V

Uobičajeno je $THD_V < 10\%$ i zanemaruje se.

Efektivna vrednost složenoperiodičnog napona jednaka je efektivnoj vrednosti osnovnog harmonika:

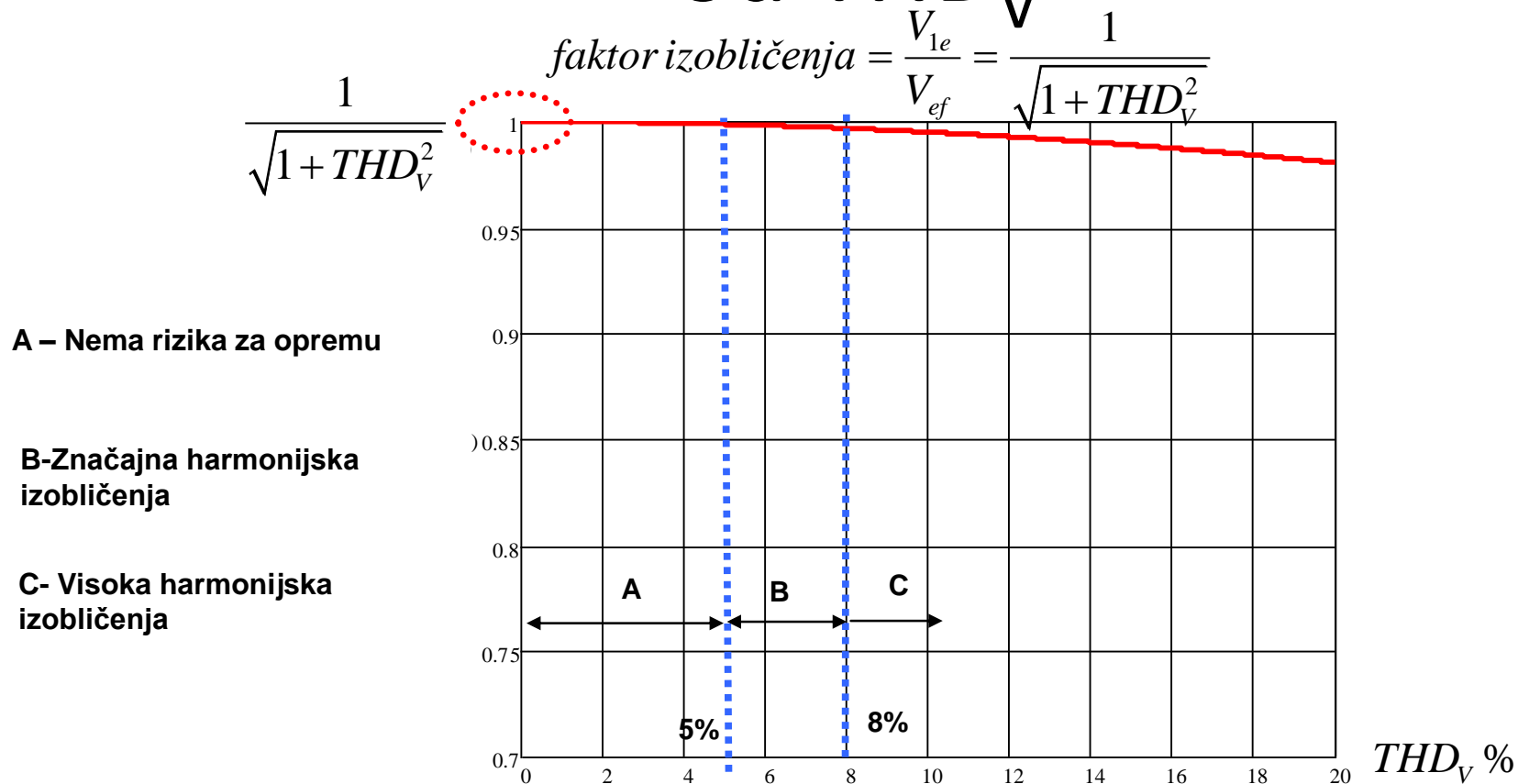
$$V_{1e} = V_{ef}$$

$$faktor\ snage = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot \cos(\varphi_1)$$

Note: An arrow in the original image points from the '1' in the numerator of the first fraction to the '= 1' above the second fraction, indicating that the first fraction is simplified to 1.

$$faktor\ snage = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot \cos(\varphi_1)$$

Zavisnost faktora izobličenja od THD_V



$$faktor\ snage = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot \cos(\varphi_1)$$

IEEE-519 voltage distortion limits

Table 2.5 IEEE Standard 519-1992: voltage distortion limits [21]

Bus voltage at PCC	Individual voltage distortion (%)	Total voltage distortion (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001–161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

Note: High-voltage systems can have up to 2.0% THD, where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

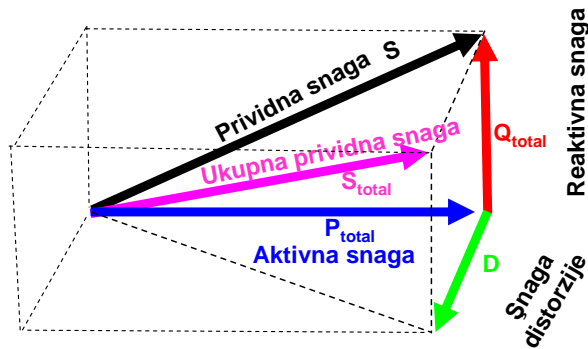
- Dozvoljene granice izobličenja mrežnog napona za srednje i visokonaponske mreže prema standardima

Neparni harmonici koji nisu deljivi sa 3		Neparni harmonici deljivi sa 3		Parni harmonici	
Red harmonika n	Harmonik napona %	Red harmonika n	Harmonik napona %	Red harmonika n	Harmonik napona %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
> 25	$0.2 + 0.5 \cdot 25/n$				

Ukupni faktor izobličenja napona 8 %.

Upotreba kondenzatora za kompenzaciju reaktivne energije [4]

$$S_{total} = \sqrt{P_{total}^2 + Q_{total}^2 + D^2}$$

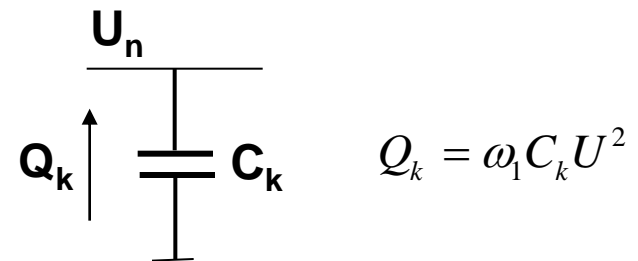
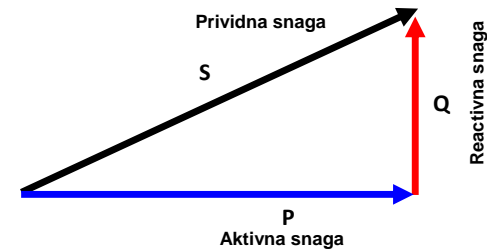


Primena kondenzatora u prisustvu opreme koja stvara harmonike može imati neželjene efekte.

Važno je napomenuti da kondenzatori sami po sebi ne generišu harmonike, ali mogu da pojačaju one koje postoje u mreži!

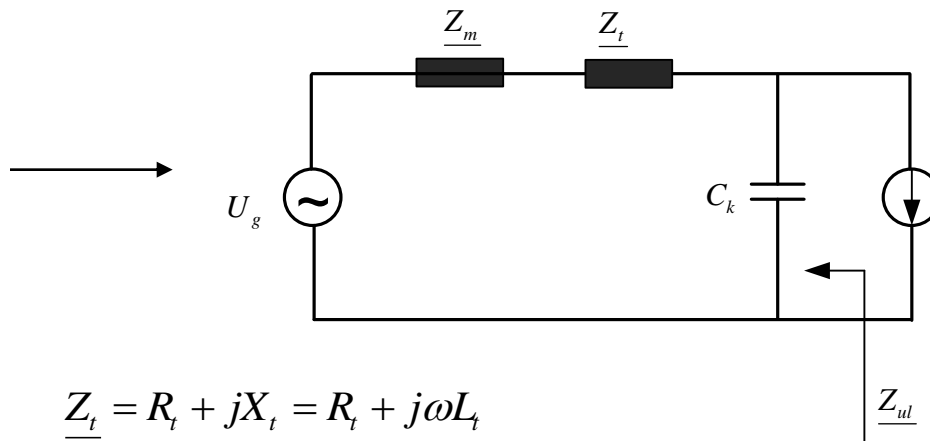
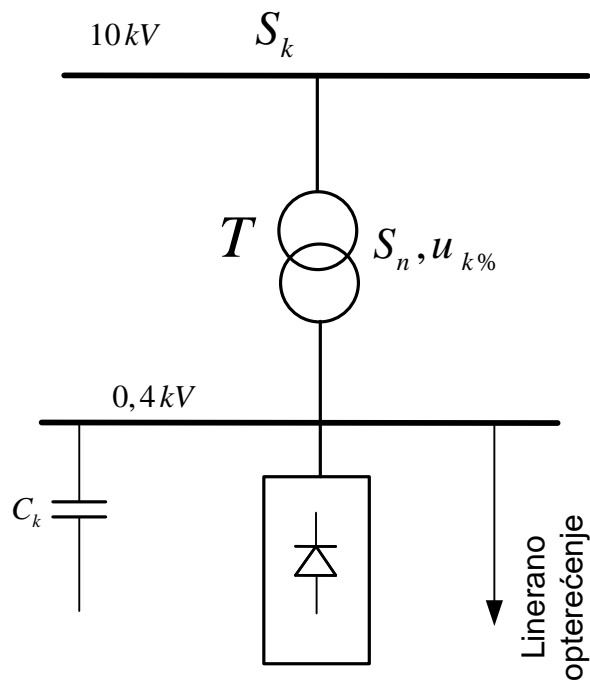
Potrebno je izvršiti proračun filtera za poništavanje harmonika struje!

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



Kondenzator može da obezbedi reaktivnu snagu samo pri osnovnoj učestanosti, ne može se koristiti za korekciju faktora snage u prisustvu harmonika!

Pojava rezonanse u mreži pri kompenzaciji Q u prisustvu viših harmonika struje



$$\underline{Z}_t = R_t + jX_t = R_t + j\omega L_t$$

$$\underline{Z}_m = R_m + jX_m = R_m + j\omega L_m$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_m + \underline{Z}_t = R_m + R_T + j(X_m + X_T)$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$$

$$\underline{Z}_{ul} = \frac{(R_1 + j\omega L_1) \cdot \left(-j \frac{1}{\omega C_k}\right)}{R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_k}\right)}$$

$$\omega_0 L_1 = \frac{1}{\omega_0 C_k}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_k}}$$

Literatura:

- [1] Bhim Singh , Ambrish Chandra , Kamal Al-Haddad, Power Quality: Problems and Mitigation Techniques, Wiley, Feb 2015, ISBN: 978-1-118-92205-7**
- [2] Danfoss, Handbook | VLT® Frequency Converters: facts Worth Knowing about Frequency Converters, 2014.**
- [3] Francisco C. De La Rosa, HARMONICS AND POWER SYSTEMS, The ELECTRIC POWER ENGINEERING Series, Series Editor Leo L. Grigsby, Distribution Control Systems, Inc. Hazelwood, Missouri, U.S.A., Taylor & Francis Group, LLC, 2006.**
- [4] Projekat i puštanje u rad odlagača ARs 2000 na PK Drmno - Elektro deo, Laboratorija za elektromotorne pogone, ETF Beograd, 2007-2008. god.**

Harmonici u pogonskim sistemima

II deo

Sadržaj i organizacija predavanja

- Nelinearna opterećenja
- Uticaj naponskih i strujnih harmonika
- Svojstva pogonskog sistema koja utiču na harmonike
- 6-pulsni diodni most
 - Pravougaoni talasni oblik struje
 - Talasni oblik struje u zavisnosti od induktivnosti na jednosmernoj ili naizmjeničnoj strani ispravljača

Sadržaj i organizacija predavanja

- 6-pulsni diodni most –primer sračunavanja harmonika struje u zavisnosti od L_{ac}
- 12- pulsna konfiguracija dva 6-pulsna mosta
 - Poništavanje 5 harmonika
 - Poništavanje 7 harmonika
- 12-pulsni ispravljač – harmonijski sadržaj

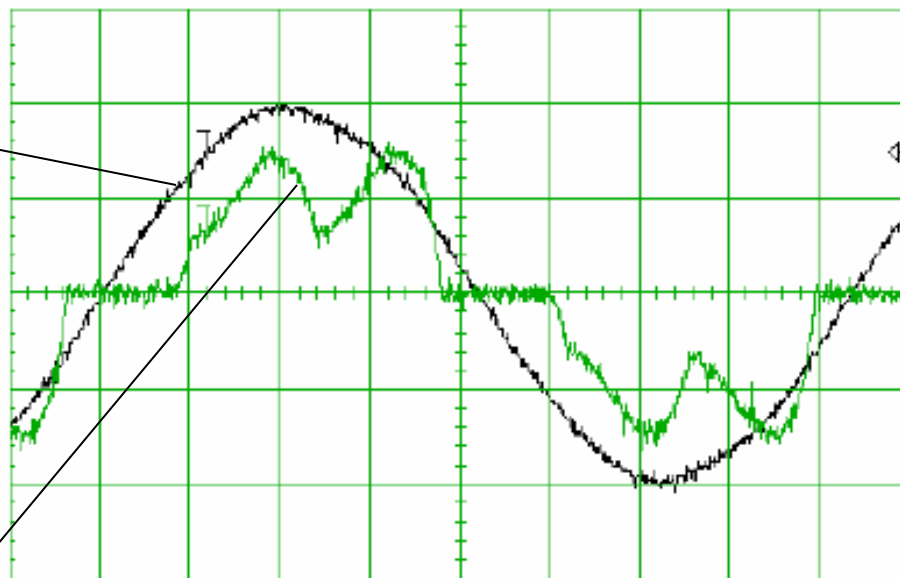
Sadržaj i organizacija predavanja

- 12- pulsna konfiguracija dva i više
6-pulsna mosta – Odlagač ARS 2000
 - Merenja na sekundaru transformatora T1
 - Merenja na primaru transformatora T1
 - Poređenje merenih vrednosti
- Poređenje različitih konfiguracija višepulsnih pretvarača

Nelinearna opterećenja

Talasni oblik mrežne struje u prisustvu nelinearnog opterećenja nije isti kao i talasni oblik napona napajanja tog opterećenja.

Sinusni napon napajanja



Struja usled
provođenja
ispravljača

Nelinearna opterećenja

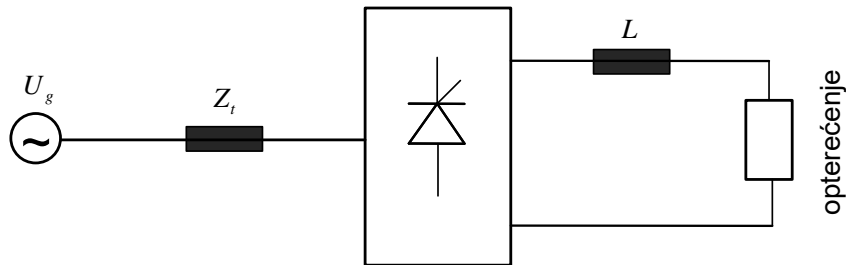
Primeri nelinearnih opterećenja

- mašine za zavarivanje, elektrolučne peći, indukcijske peći,
- regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim i jednosmernim motorima

- kancelarijska oprema (računari, fotokopir mašine, faks mašine, UPS-evi)
- instalacije u domaćinstvima (napajanje TV, mikrotalsne peći, fluorescentno osvetljenje)

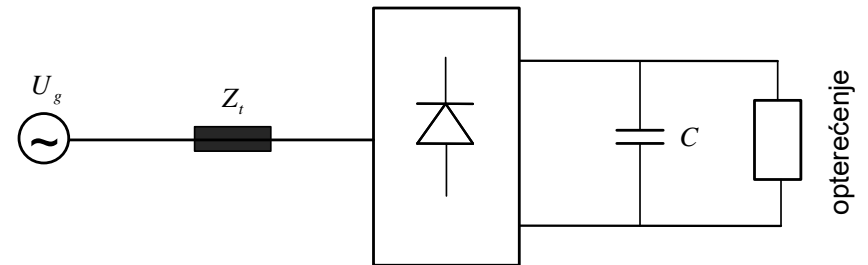
Nelinearna opterećenja

Nelinearno strujno opterećenje



Tiristorski most za regulisani
elektromotorni pogon
sa jednosmernim motorom

Nelinearno naponsko opterećenje



Diodni ispravljač za regulisani
elektromotorni pogon
sa asinhronim motorom

Uticaj naponskih harmonika [1]

Naponski harmonici

**Stvaraju dodatno zagrevanje asinhronih motora,
sinhronih motora i generatora**

**Pikovi viših harmonika mogu izazvati starenje izolacije kablova,
namotaja i kondenzatora**

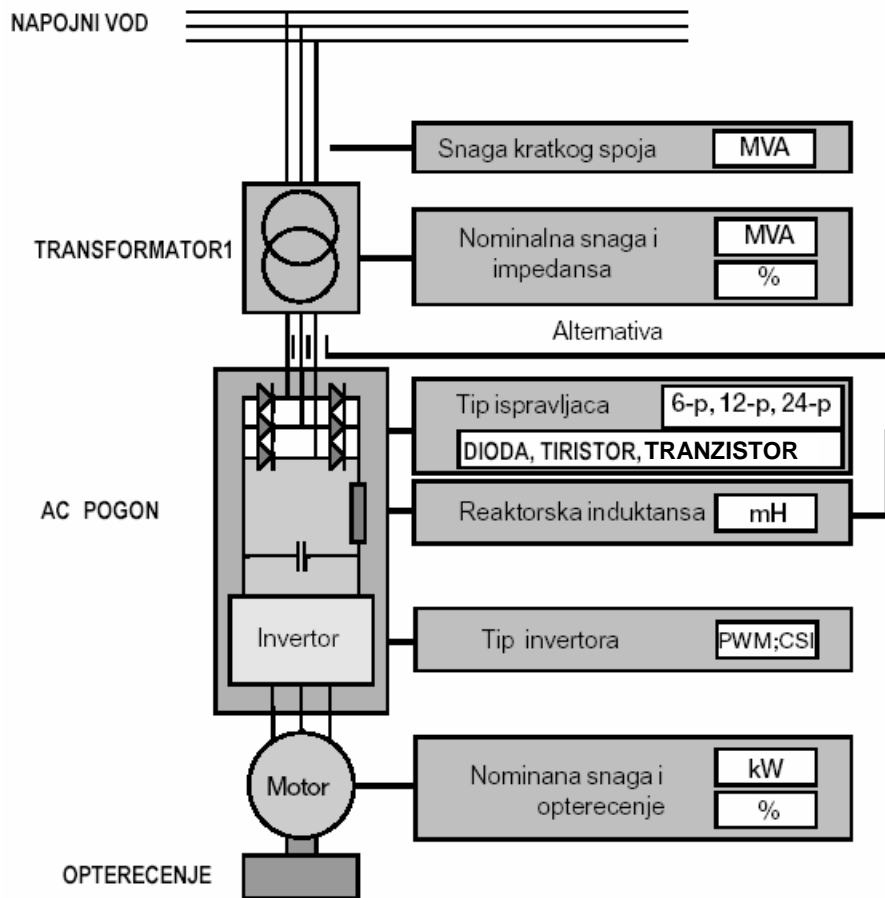
**Neispravan rad elektronskih komponenti i kola
koja koriste naponski talas za sinhronizaciju**

Uticaj strujnih harmonika [1]

Strujni harmonici

- U namotajima motora mogu izazvati elektromagnetnu interferenciju i deformaciju momenta
- U kablovima prouzrokuju dodatno zagrevanje kabla iznad granice koja je dozvoljena
- U transformatorima prouzrokuju dodatno zagrevanje iznad granice koja je dozvoljena
- Kroz prekidače i razvodnu opremu izazivaju povećanje zagrevanja i lažne alarme sa opreme
- Rezonantne struje koje stvaraju strujni harmonici i različite topologije filtriranja u energetsom postrojenju mogu izazvati kvar na kondenzatorima i drugoj elektro opremi
- Mogu izazvati lažno reagovanje prekidača i zaštitnih releja.

Svojstva pogonskog sistema koja utiču na harmonike [2]



Veća snaga kratkog spoja izvora napajanja

Niži harmonici napona

Niža impedansa transformatora

Niži harmonici napona

Veća nominalna snaga transformatora

Niži harmonici napona

Veća trofazna prigušnica (alternativa prigušnici u jednosmernom međukolu)

Niži harmonici struje

Veći broj impulsa u ispravljaču

Niži harmonici struje

Veća jednosmerna prigušnica

Niži harmonici struje

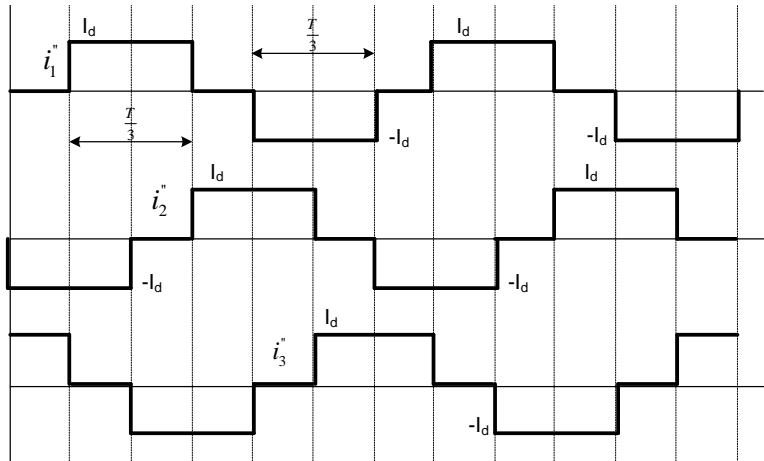
Veća nominalna snaga motora

Viši harmonici struje

Veća opterećenje motora

Viši harmonici struje

6-pulsni diodni most



Pravougaoni talasni oblici struja pri velikoj L

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{3}} I_d^2 dt} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Efektivna vrednost linijske struje

I_d

Struja na izlazu iz pretvarača

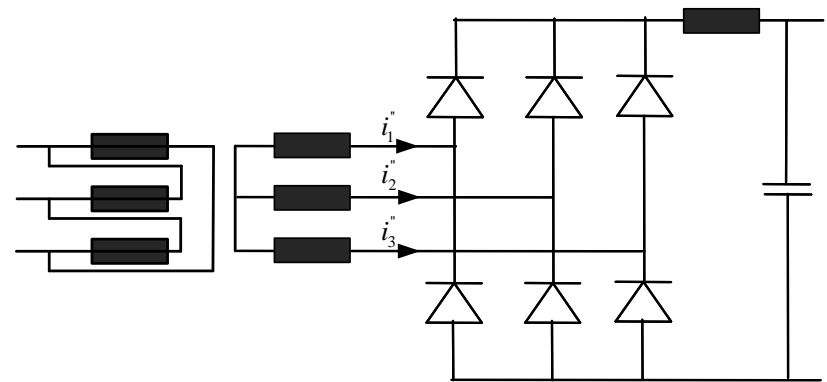
(za velike vrednosti induktivnosti prigušnice u jednosmernom kolu)

$$I_1 = \frac{3}{\pi} \cdot I_{ef}$$

Prvi harmonik struje

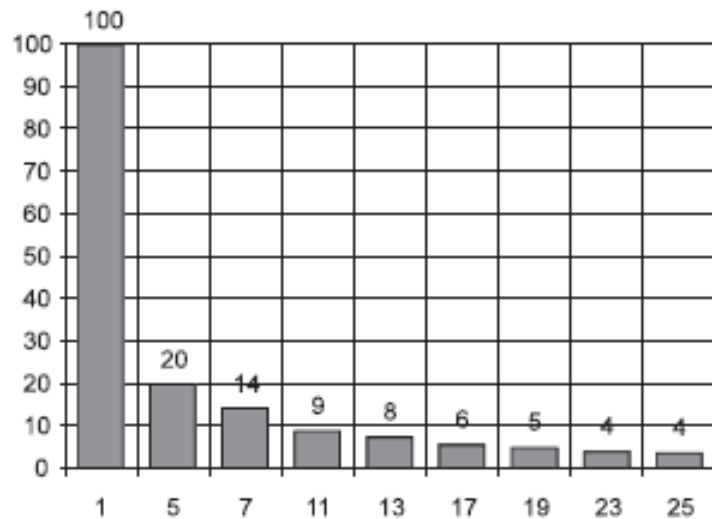
$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

n-ti harmonik struje

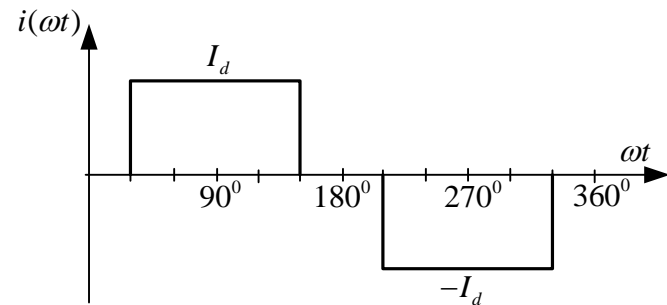


Trofazni diodni most sa transformatorom u sprezi Dy

Pravougaoni talasni oblik struje



Harmonijski sadržaj za teorijski pravougaoni talasni oblik struje



$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t)$$

$$B_n = \frac{4}{\pi n} I_d \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right)$$

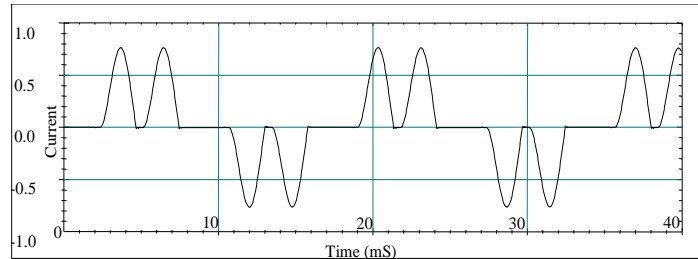
$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi n} I_d \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \cdot \sin(n\omega t)$$

$$i(t) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) - \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) \dots \right]$$

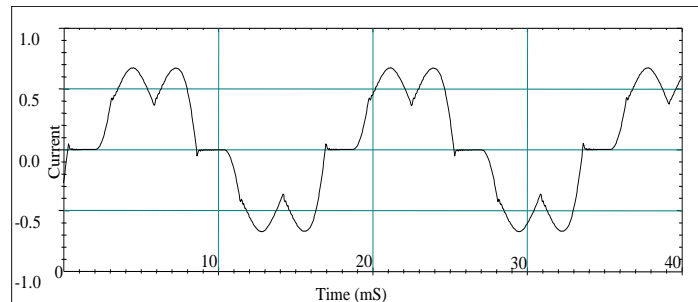
$$I_{1\max} = \frac{4}{\pi} I_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Uticaj prigušnice u jednosmernom međukolu na talasni oblik struje kod 6-pulsnog diodnog mosta

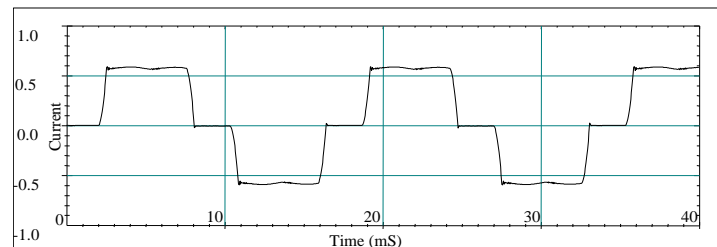
6 –pusni ispravljač sa kondenzatorom u međukolu i bez prigušnice



6 - pusni ispravljač sa kondenzatorom u međukolu i sa prigušnicom male induktivnosti



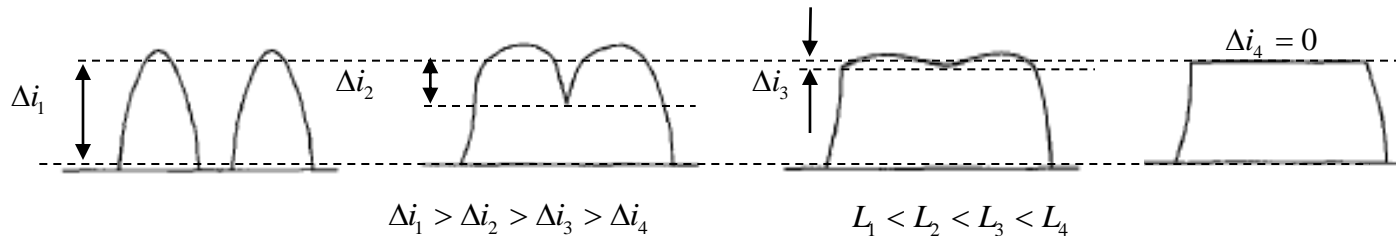
6 - pusni ispravljač sa prigušnicom velike induktivnosti



6-pulsni diodni most – izobličenje struje [3]

$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{n}$ Teorijski - n –ti harmonik ima n puta manju amplitudu

Praktično - ne opisuje adekvatno stvarnu amplitudu n –tog harmonika



$\Delta i = \frac{\int e(t) dt}{L}$ **Maksimalno odstupanje struje od srednje vrednosti jednosmerne struje**

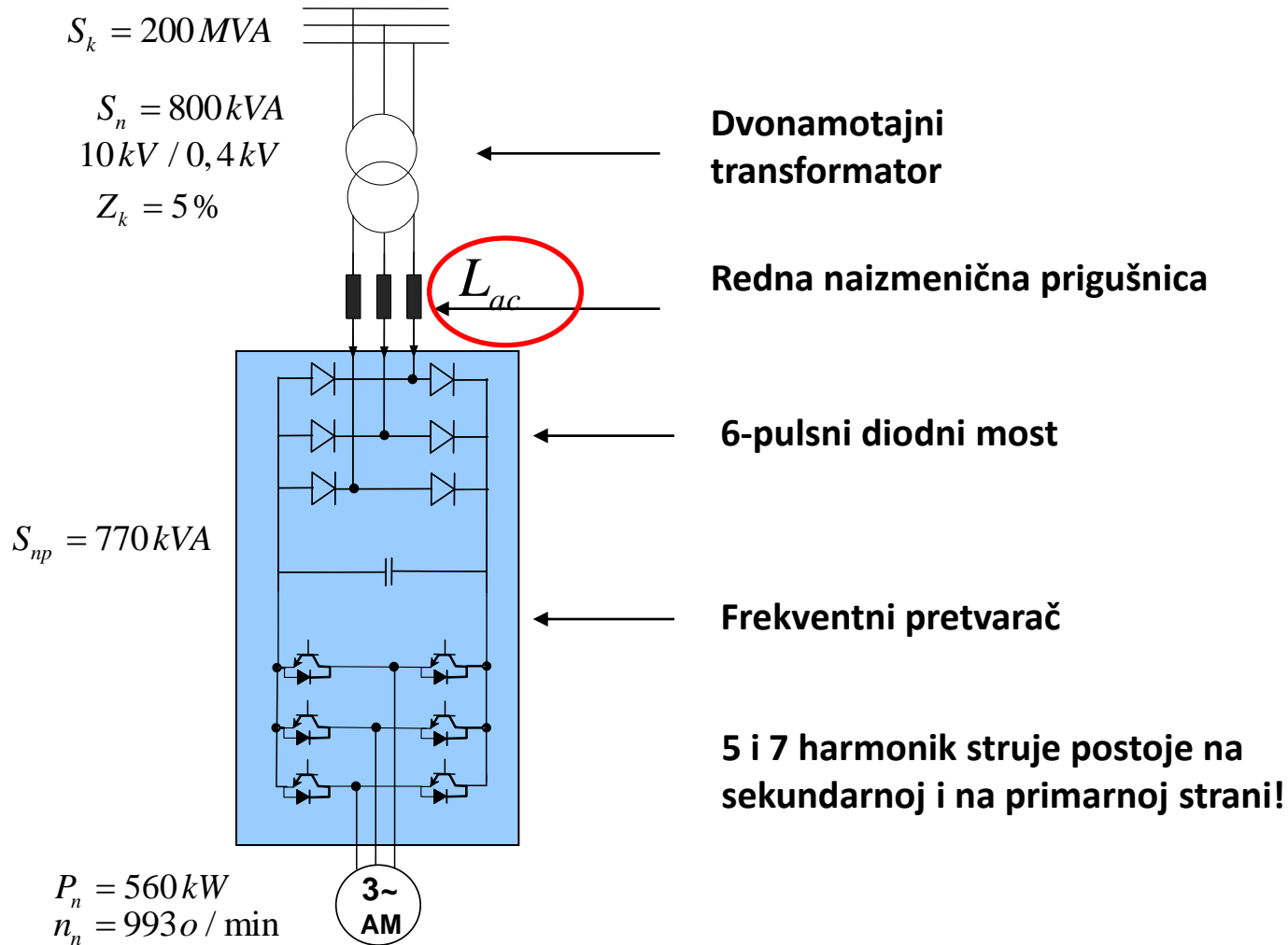
Povećanje izobličenja povećava 5-ti harmonik struje, dok smanjuje 7 harmonik i harmonike višeg reda.

$$\frac{I_n}{I_1} = \left[\frac{1}{n} + \frac{6,46r}{n-1} - \frac{7,13r}{n} \right] (-1)^k, \quad n = 6k - 1$$

$$r = \frac{\Delta i}{I_d}$$

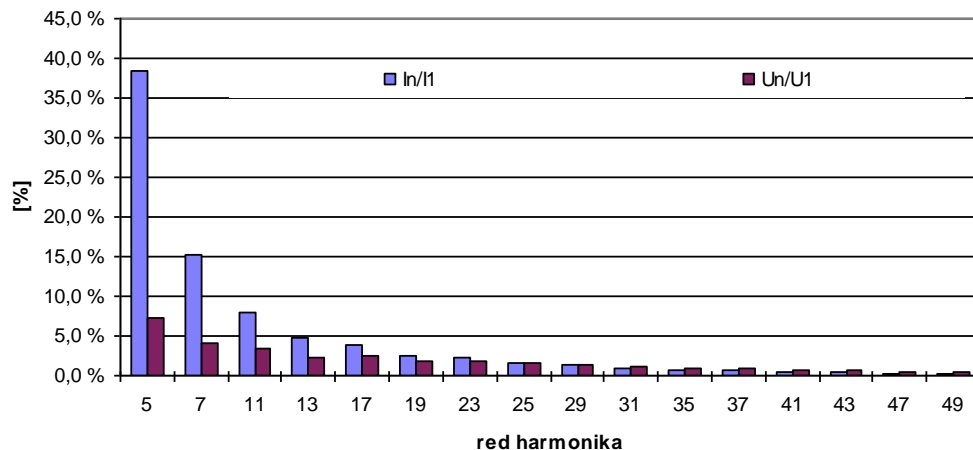
$$\frac{I_n}{I_1} = \left[\frac{1}{n} + \frac{6,46r}{n+1} - \frac{7,13r}{n} \right] (-1)^k, \quad n = 6k + 1$$

6-pulsni diodni most – primer određivanja harmonijskog sadržaja

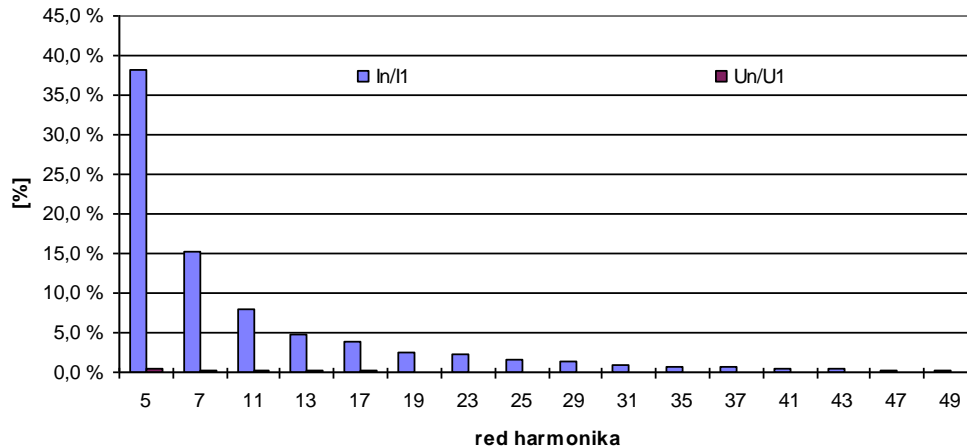


6-pulsni diodni most – promena induktivnosti $L_{ac}=0$ [1]

Sekundarna strana transformatora



Primarna strana transformatora



$$L_{ac} = 0 \mu H$$

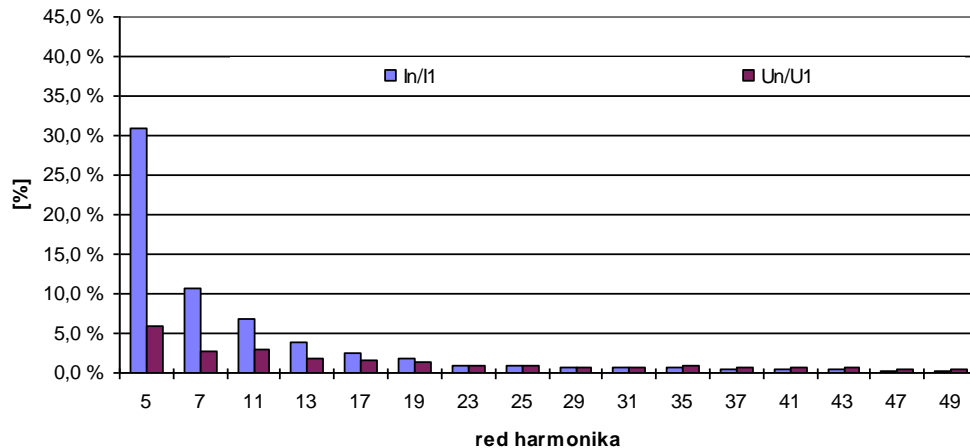
$$THD_i = 42,6\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

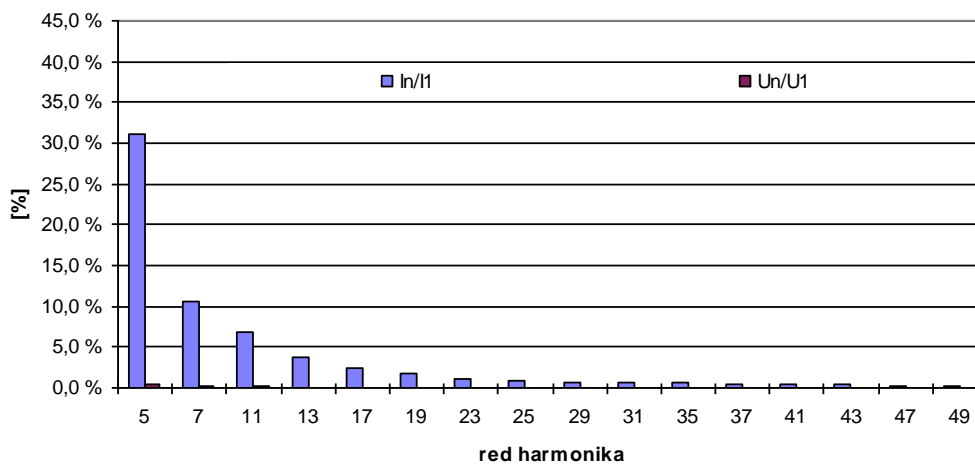
$$F.S._{ukupni} = 0,902$$

6-pulsni diodni most – promena induktivnosti L_{ac} -20 [1]

Sekundarna strana transformatora



Primarna strana transformatora



$$L_{ac} = 20 \mu H$$

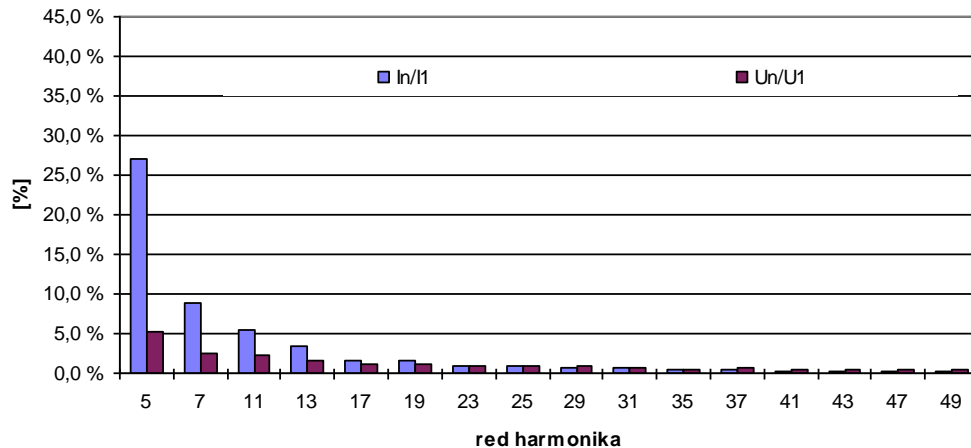
$$THD_i = 33,9\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

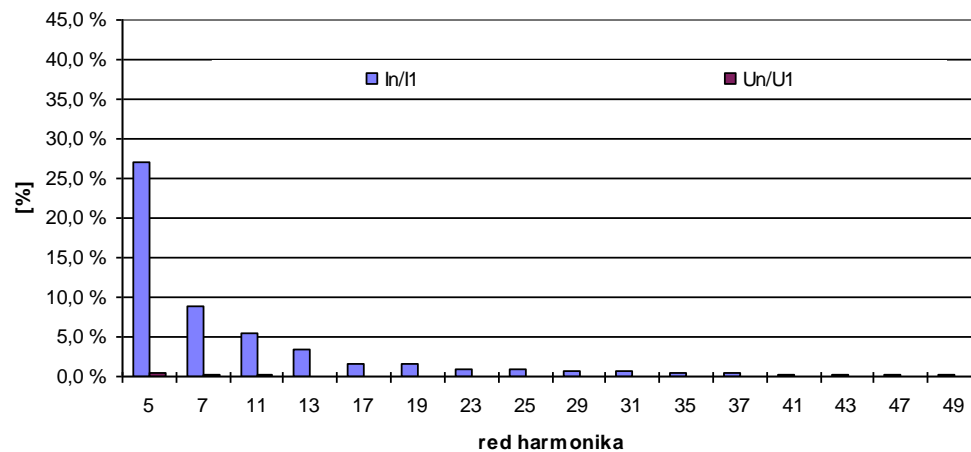
$$F.S._{ukupni} = 0,928$$

6-pulsni diodni most – promena induktivnosti Lac-40 [1]

Sekundarna strana transformatora



Primarna strana transformatora



$$L_{ac} = 40 \mu H$$

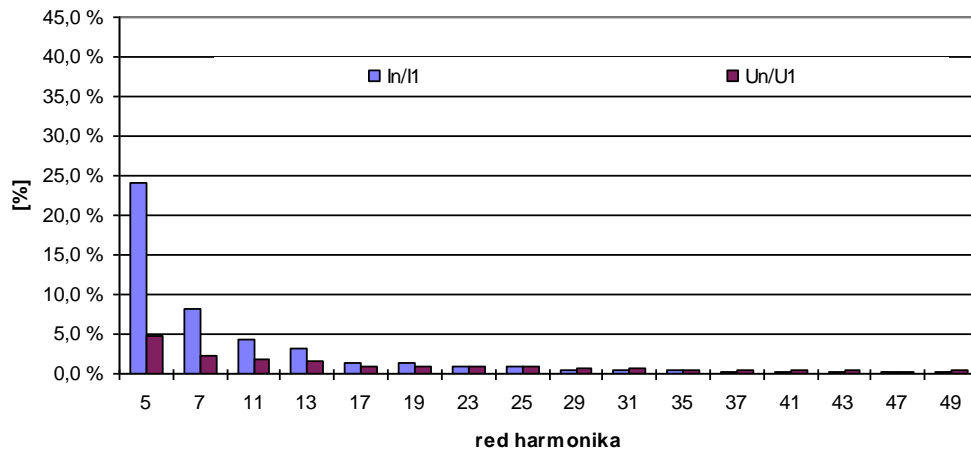
$$THD_i = 29,2\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

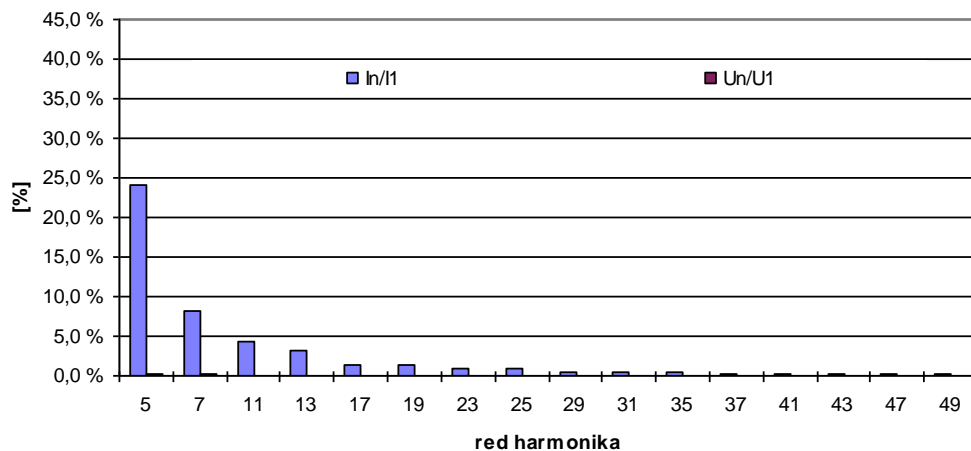
$$F.S._{ukupni} = 0,941$$

6-pulsni diodni most – promena induktivnosti Lac-60 [1]

Sekundarna strana transformatora



Primarna strana transformatora



$$L_{ac} = 60 \mu H$$

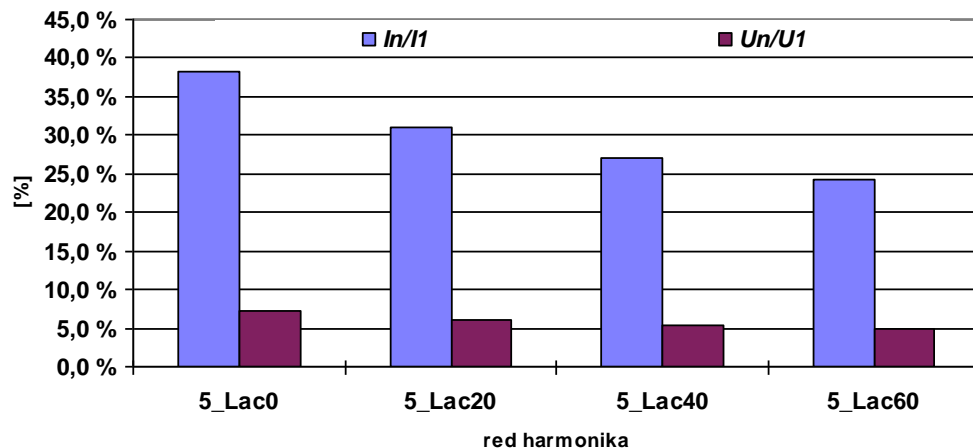
$$THD_i = 26,2\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

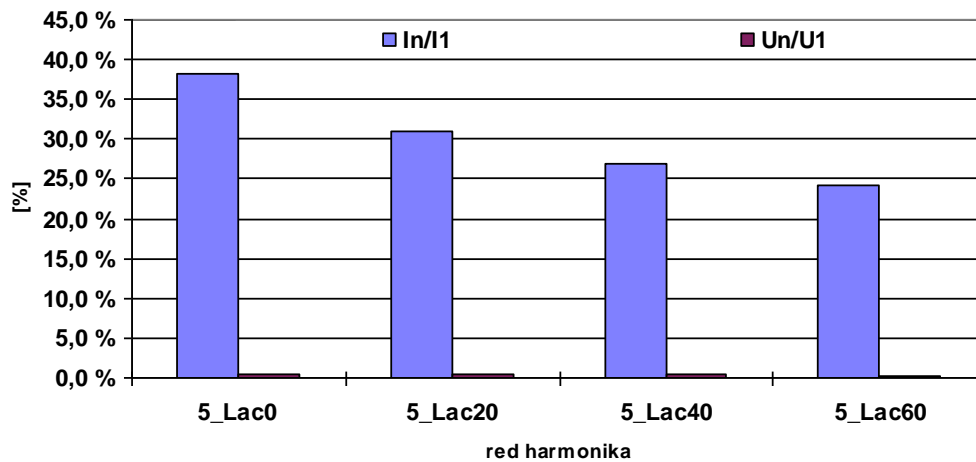
$$F.S._{ukupni} = 0,948$$

6-pulsni diodni most – 5 harmonik pri promeni naizmenične induktivnosti Lac [1]

Sekundarna strana transformatora

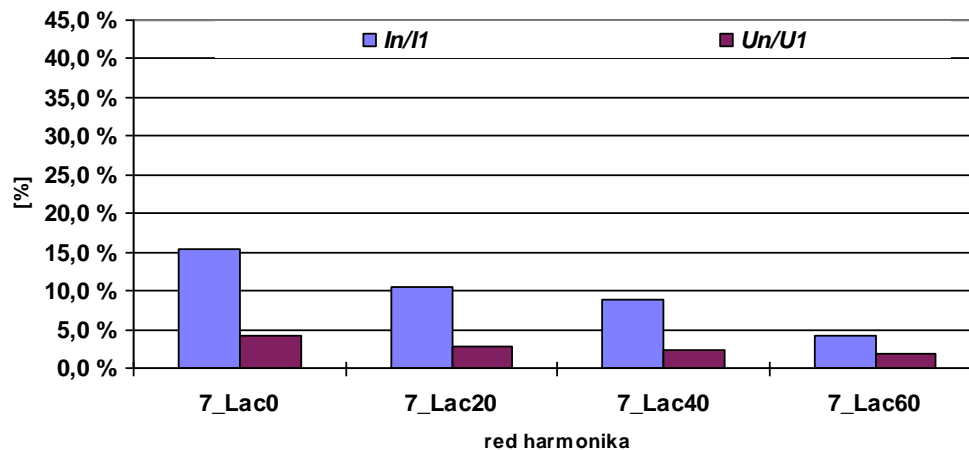


Primarna strana transformatora

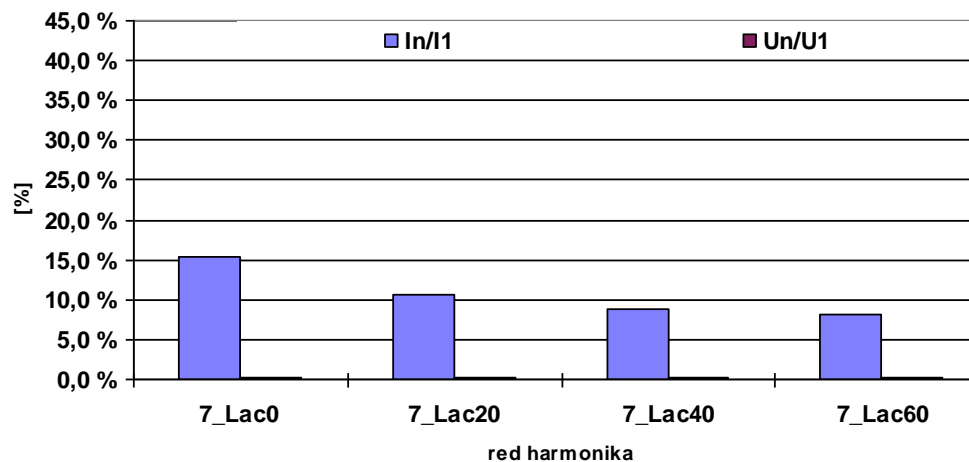


6-pulsni diodni most – 7 harmonik pri pomeni naizmenične induktivnosti Lac [1]

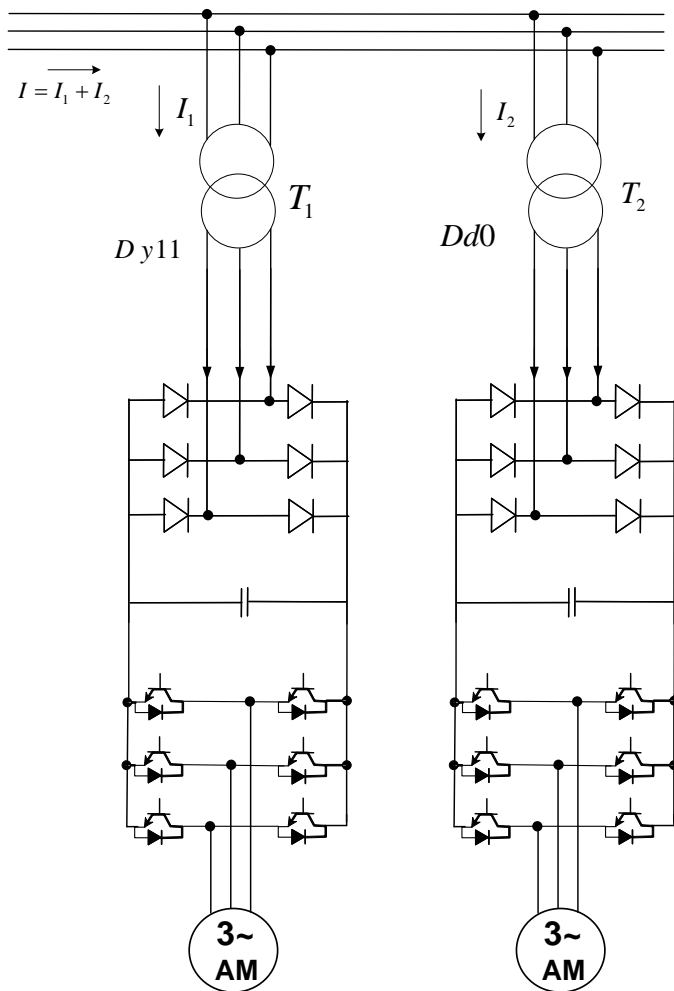
Sekundarna strana transformatora



Primarna strana transformatora



12- pulsna konfiguracija dva 6-impulsna mosta [1]



$$A_{kq\pm 1} = \frac{(-1)^k q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}{(kq \pm 1)\pi} \cos(kq\delta)$$

$A_{kq\pm 1}$ **Koeficijent viših strujnih harmonika primara transformatora**

$n = kq \pm 1$ **Redni broj harmonika**

$k = 1, 2, 3, \dots$

$q = 6$ **Broj komutacija u toku jedne periode**

δ **Ugao koji predstavlja fazni pomeraj faznih napona primara i sekundara transformatora (grupa sprege)**

$\delta_1 = 30^\circ$ $Dy11$ **Za trafo T1**

$\delta_2 = 0^\circ$ $Dd0$ **Za trafo T2**

Paralelna veza dva šestopulsna. Biće poništavanje 5. i 7. harmonika samo ako su struje AM jednake, t.j. ako je opterećenje simetrično (primer pogonskih bubnjeva za trake na odlagaču).

12- pulsna veza dva 6-pulsna mosta, analitičko poništavanje 5 harmonika [1]

$$A_{kq\pm 1} = \frac{(-1)^k q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}{(kq \pm 1)\pi} \cos(kq\delta)$$

$$k = 1 \quad q = 6$$

$$n = kq - 1 = 1 \cdot 6 - 1$$

$$n = 5$$

$$\delta_1 = 30^0 \quad Dy11 \quad \text{Za trafo T1}$$

$$I_5 = A_5 \cdot I_1$$

$$A_5 = \frac{(-1)^1 6 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{5\pi} \cos(1 \cdot 6 \cdot \delta_1) = -\frac{3}{5 \cdot \pi} \cdot \cos(1 \cdot 6 \cdot 30^0) = \frac{3}{5 \cdot \pi}$$

$$\delta_2 = 0^0 \quad Dd0 \quad \text{Za trafo T2}$$

$$A_5 = \frac{(-1)^1 6 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{5\pi} \cos(1 \cdot 6 \cdot \delta_2) = -\frac{3}{5 \cdot \pi} \cdot \cos(1 \cdot 6 \cdot 0^0) = -\frac{3}{5 \cdot \pi}$$

Koeficijent razvoja F. reda
Ista vrednost suprotni znak

$$I_5 = A_5 \cdot I_1$$

$$\underline{\underline{I_5 = I_{5T1} + I_{5T2} = 0}}$$

12- pulsna veza dva 6-pulsna mosta, analitičko poništavanje 7 harmonika [1]

$$A_{kq\pm 1} = \frac{(-1)^k q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}{(kq \pm 1)\pi} \cos(kq\delta)$$

$$k = 1 \quad q = 6$$

$$n = kq + 1 = 1 \cdot 6 + 1$$

$$n = 7$$

$$I_7 = A_7 \cdot I_1$$

$$\delta_1 = 30^\circ \quad Dy11 \quad \text{Za trafo T1}$$

$$A_7 = \frac{(-1)^1 6 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{7\pi} \cos(1 \cdot 6 \cdot \delta_1) = -\frac{3}{7 \cdot \pi} \cdot \cos(1 \cdot 6 \cdot 30^\circ) = \frac{3}{7 \cdot \pi}$$

$$\delta_2 = 0^\circ \quad Dd0 \quad \text{Za trafo T2}$$

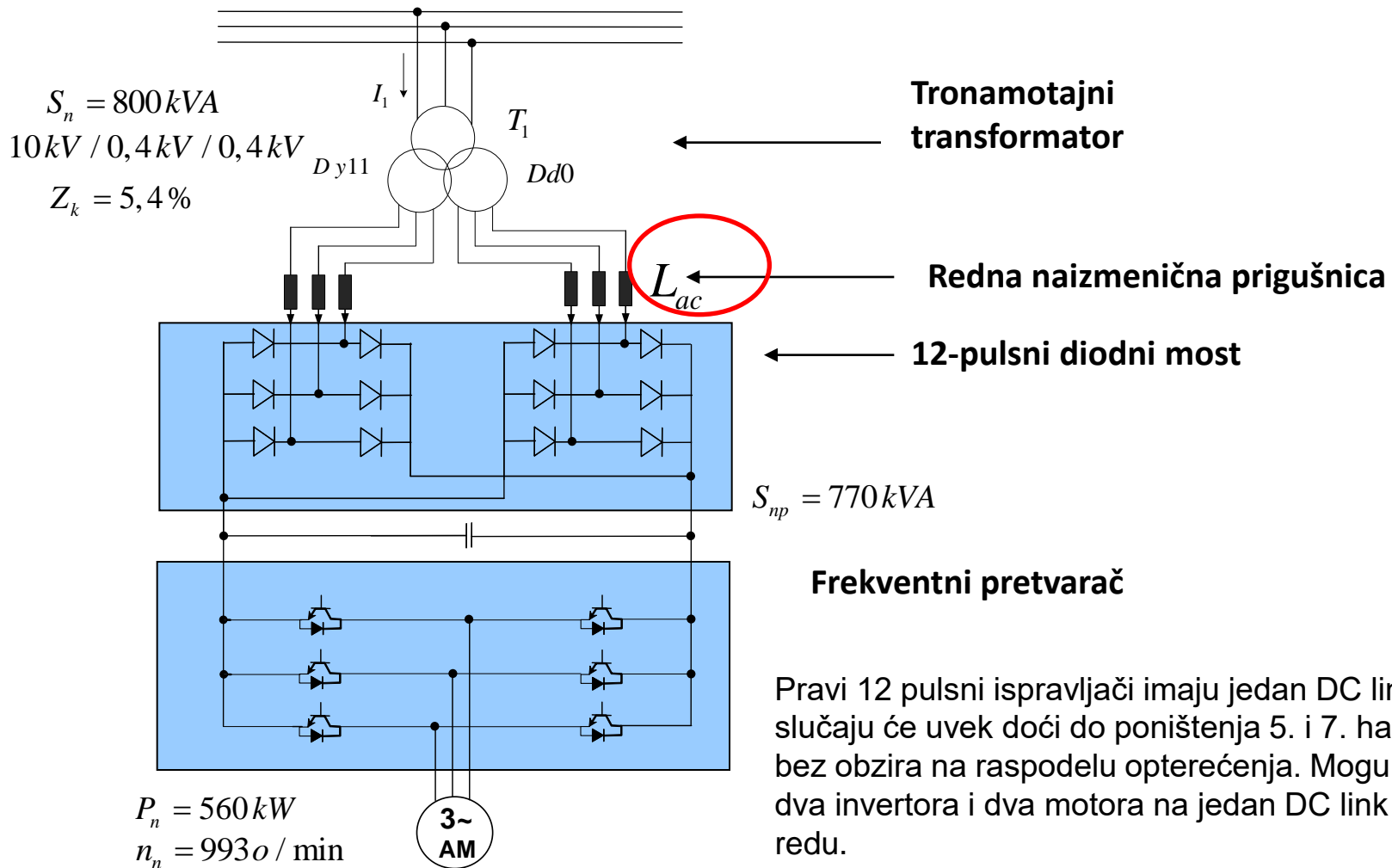
$$A_7 = \frac{(-1)^1 6 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{7\pi} \cos(1 \cdot 6 \cdot \delta_2) = -\frac{3}{7 \cdot \pi} \cdot \cos(1 \cdot 6 \cdot 0^\circ) = -\frac{3}{7 \cdot \pi}$$

Koeficijent razvoja F. reda
Ista vrednost suprotni znak

$$I_7 = A_7 \cdot I_1$$

$$\underline{\underline{I_7 = I_{7T1} + I_{7T2} = 0}}$$

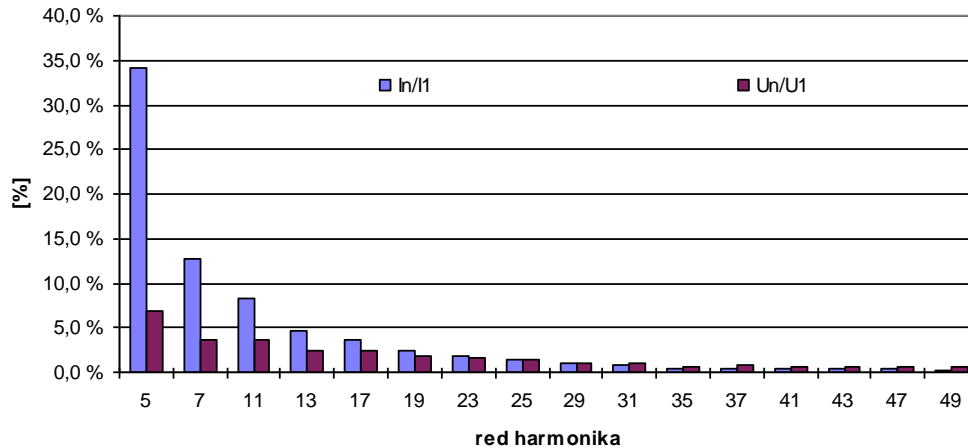
12-pulsni ispravljač – harmonijski sadržaj



Pravi 12 pulsni ispravljači imaju jedan DC link. U ovom slučaju će uvek doći do poništenja 5. i 7. harmonika, bez obzira na raspodelu opterećenja. Mogu da se vežu dva invertora i dva motora na jedan DC link i sve će biti redu.

12-pulsni pretvarač – promena induktivnosti $L_{ac}=0$ [1]

Sekundarna strana transformatora



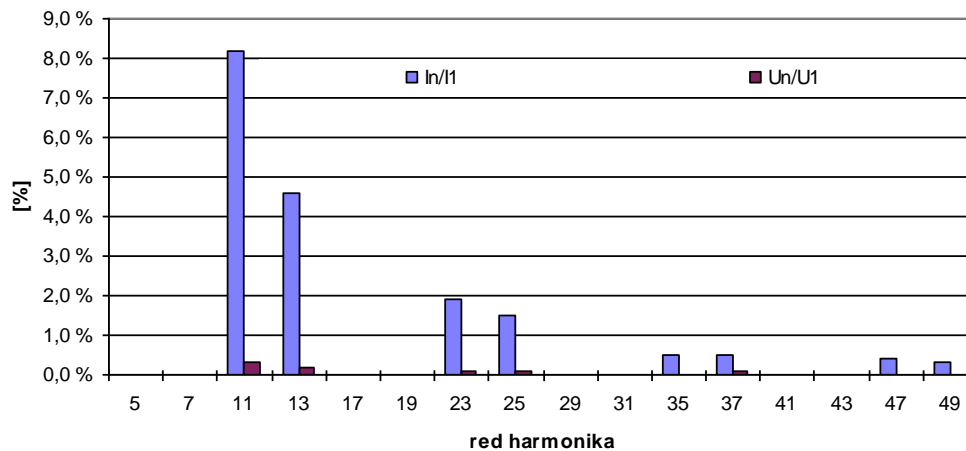
$$L_{ac} = 0 \mu H$$

$$THD_i = 38,0\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

$$F.S._{ukupni} = 0,916$$

Primarna strana transformatora



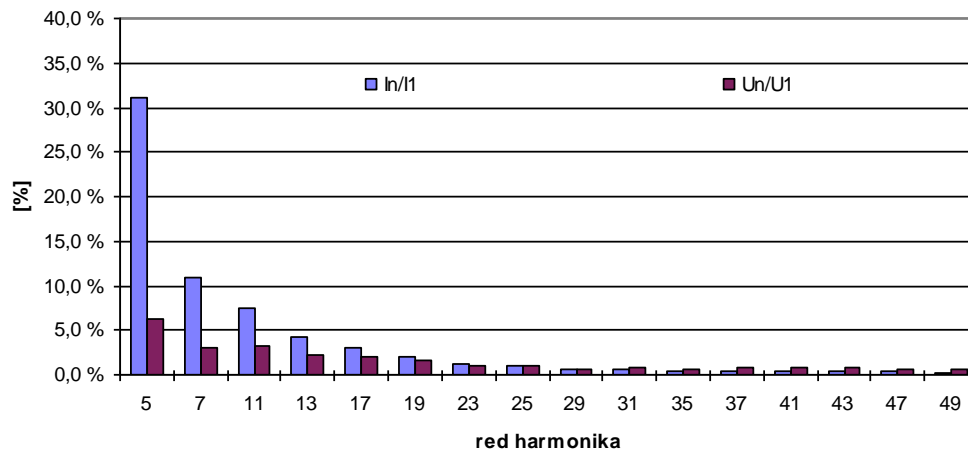
$$THD_i = 9,7\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

$$F.S._{ukupni} = 0,916$$

12-pulsni pretvarač – promena induktivnosti Lac-20 [1]

Sekundarna strana transformatora



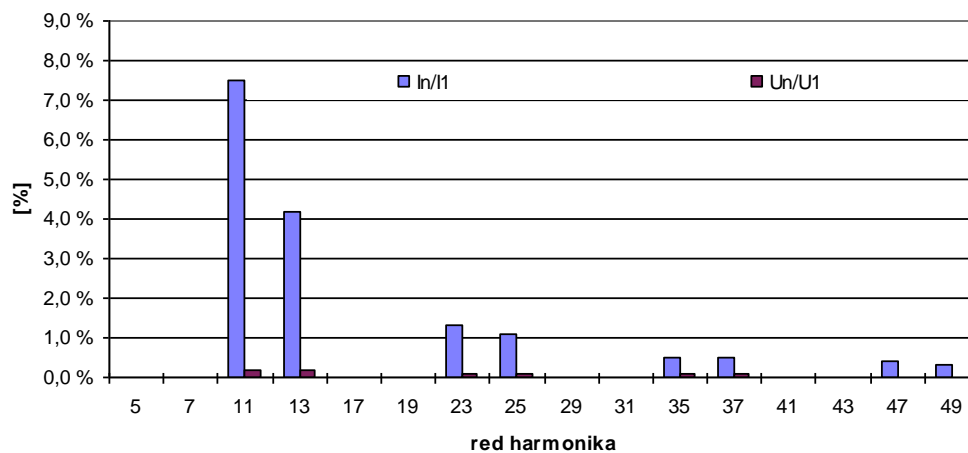
$$L_{ac} = 20 \mu H$$

$$THD_i = 34,5\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

$$F.S._{ukupni} = 0,926$$

Primarna strana transformatora



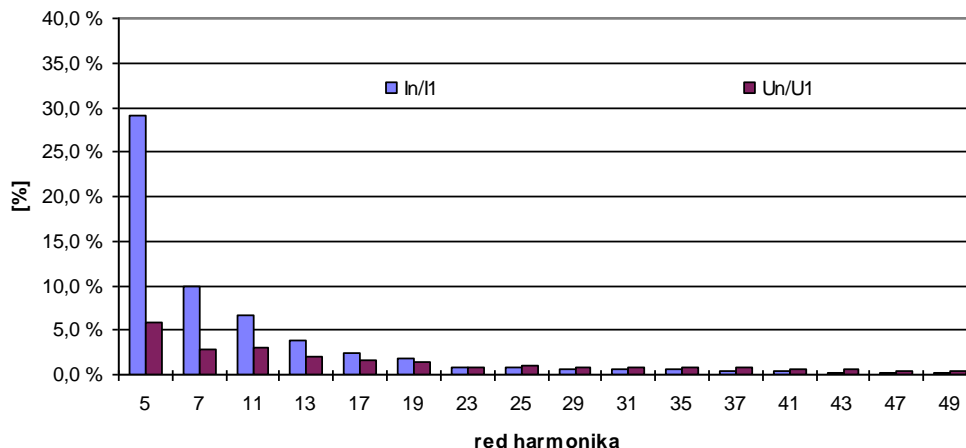
$$THD_i = 8,7\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

$$F.S._{ukupni} = 0,926$$

12-pulsni pretvarač – promena induktivnosti Lac-40 [1]

Sekundarna strana transformatora



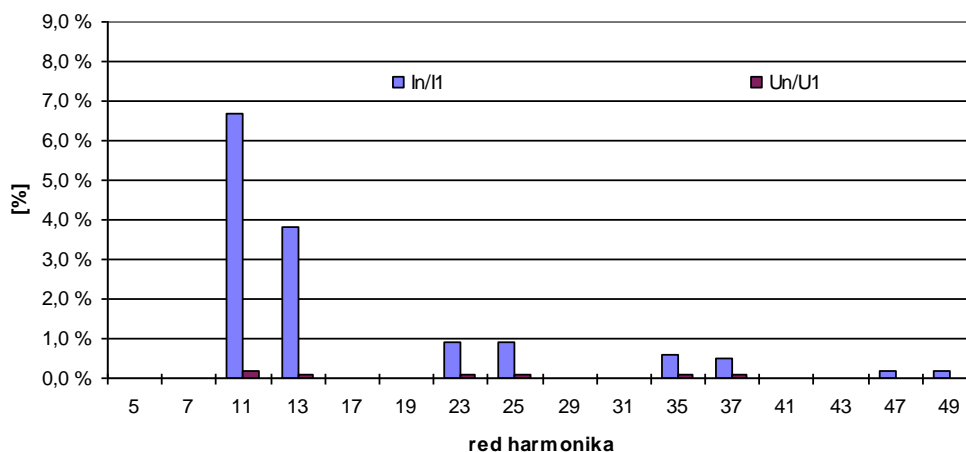
$$L_{ac} = 40 \mu H$$

$$THD_i = 31,9\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

$$F.S._{ukupni} = 0,934$$

Primarna strana transformatora



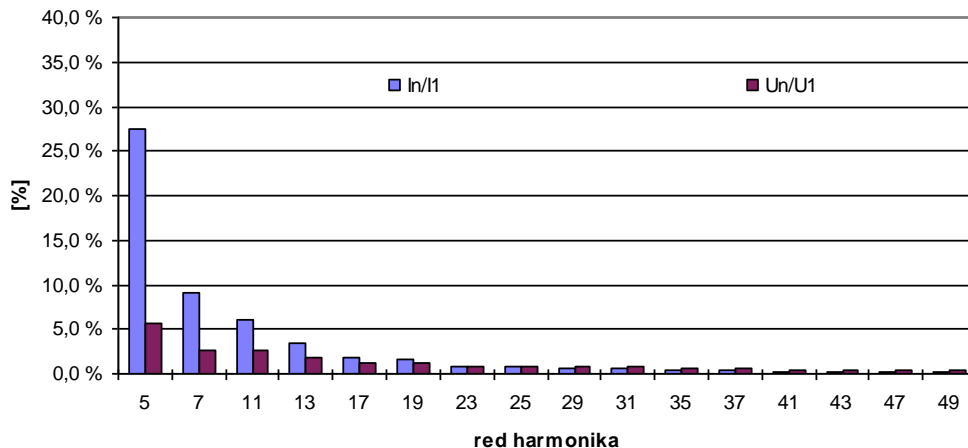
$$THD_i = 7,8\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

$$F.S._{ukupni} = 0,934$$

12-pulsni pretvarač – promena induktivnosti Lac-60 [1]

Sekundarna strana transformatora



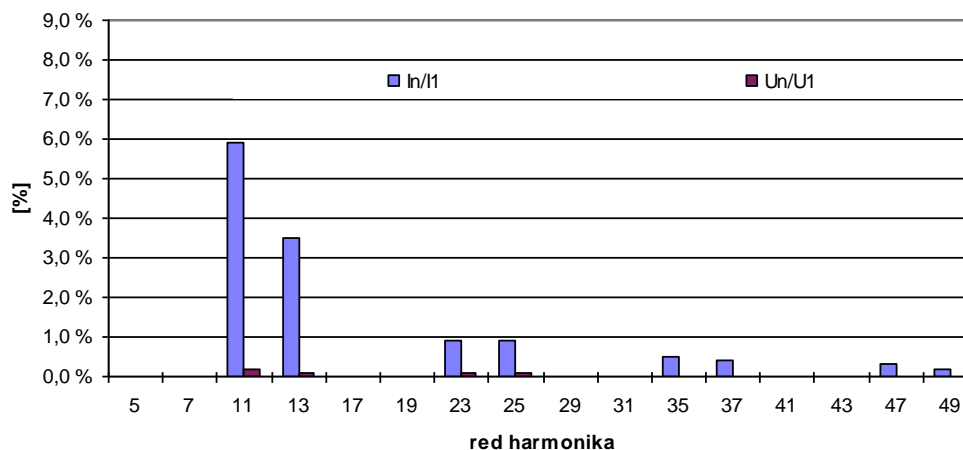
$$L_{ac} = 60 \mu H$$

$$THD_i = 29,9\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

$$F.S._{ukupni} = 0,939$$

Primarna strana transformatora



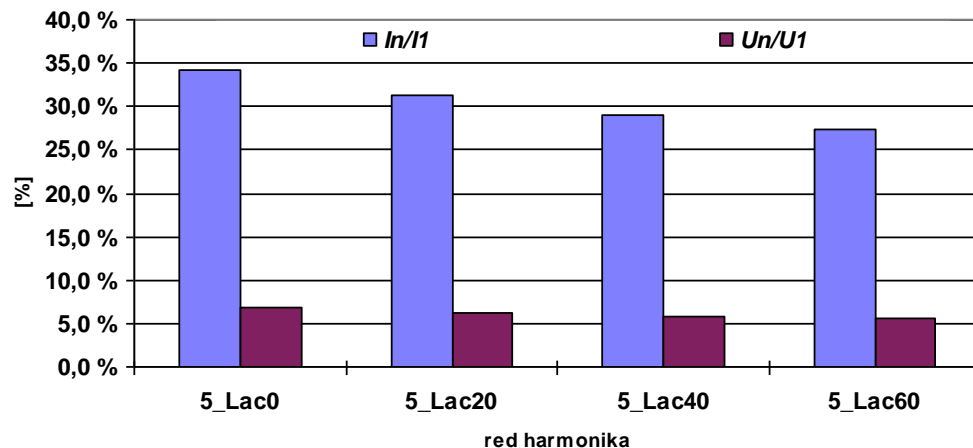
$$THD_i = 7,1\%$$

$$\cos \varphi_1 = 0,98$$

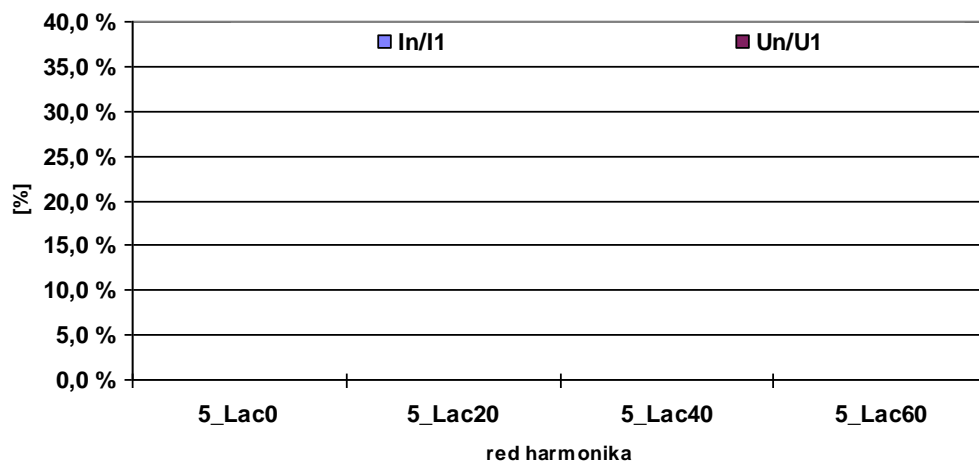
$$F.S._{ukupni} = 0,939$$

12-pulsni diodni most – poređenje 5 harmonika pri pomeni naizmenične induktivnosti L_{ac} [1]

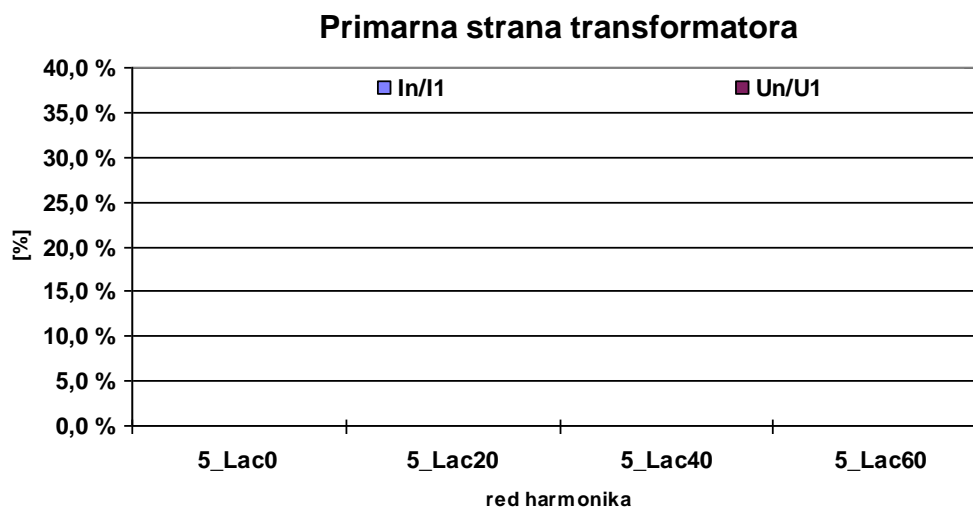
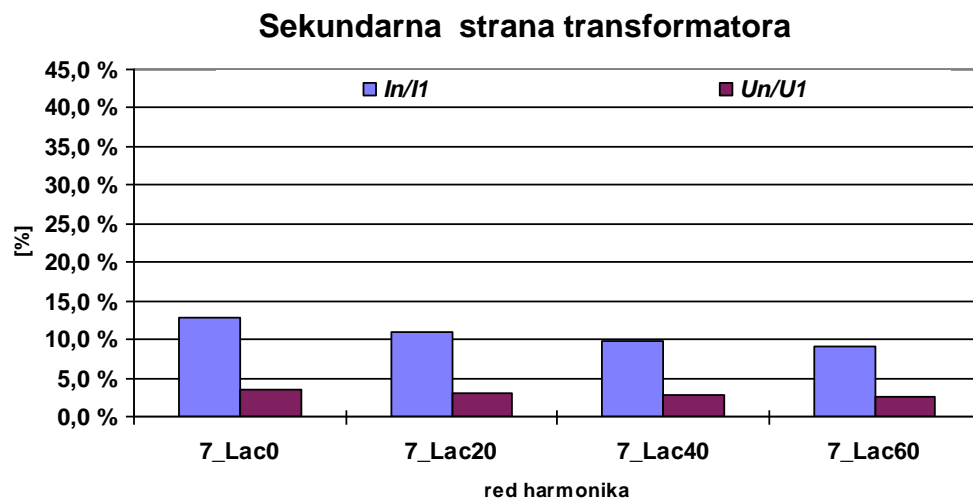
Sekundarna strana transformatora



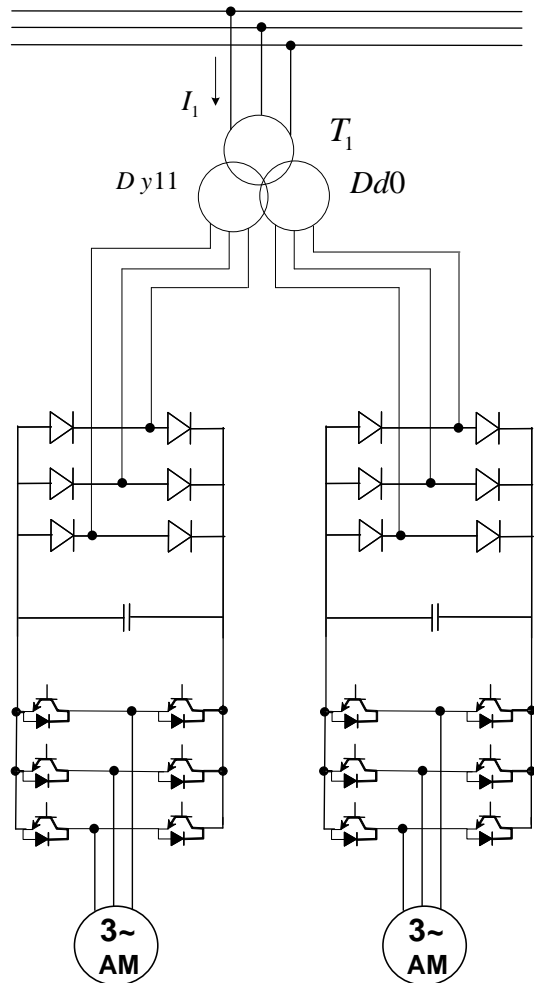
Primarna strana transformatora



12-pulsni diodni most – poređenje 7 harmonika pri pomeni naizmenične induktivnosti Lac [1]



12- pulsna veza dva 6-pulsna mosta, jedan tronamotajni transformator [1]



$$A_{kq\pm 1} = \frac{(-1)^k q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}{(kq \pm 1)\pi} \cos(kq\delta)$$

$A_{kq\pm 1}$ **Koeficijent viših strujnih harmonika primara transformatora**

$n = kq \pm 1$ **Redni broj harmonika**

$k = 1, 2, 3, \dots$

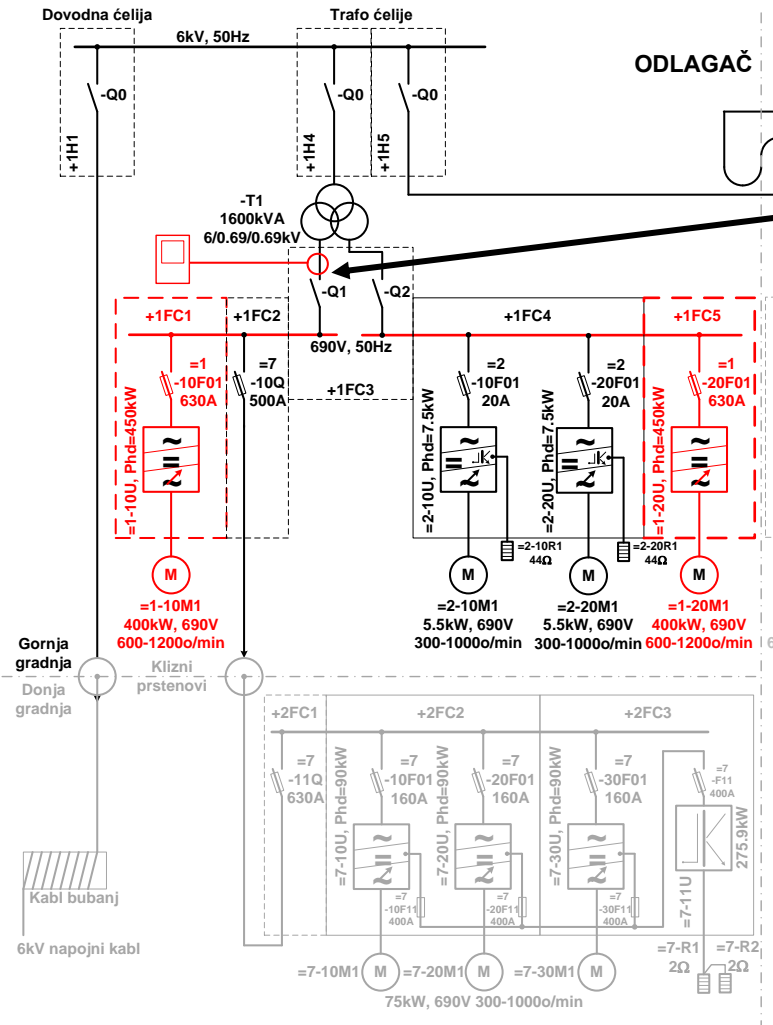
$q = 6$ **Broj komutacija u toku jedne periode**

δ **Ugao koji predstavlja fazni pomeraj faznih napona primara i sekundara transformatora (grupa sprege)**

$\delta_1 = 30^\circ$ $Dy11$ **Za trafo T1**

$\delta_2 = 0^\circ$ $Dd0$ **Za trafo T2**

12- pulsna veza dva i više 6-pulsna mosta Odlagač ARs 2000 – Sekundar transformatora [1]



Merna tačka 1

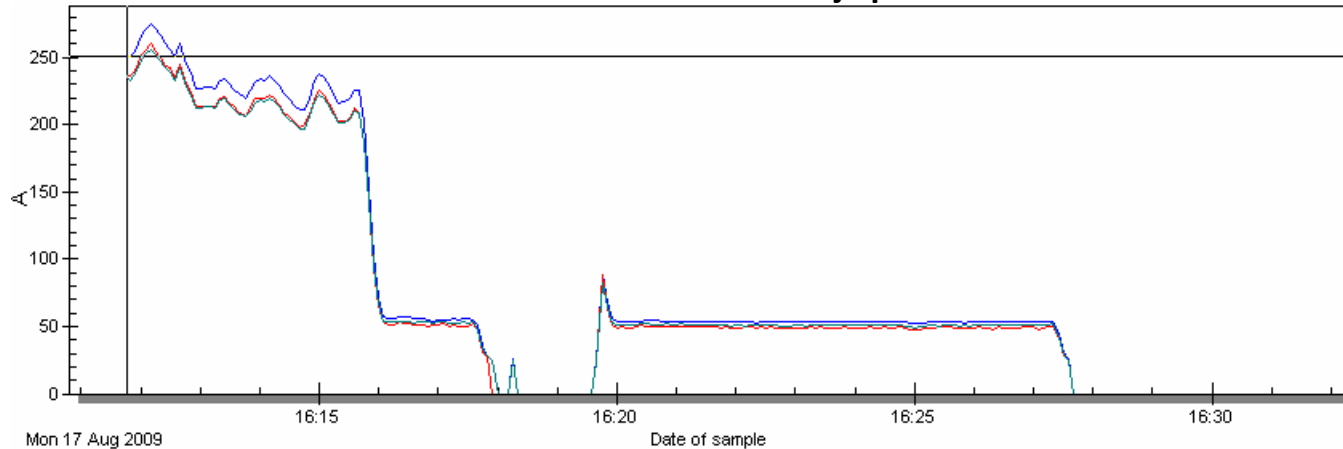
Vreme snimanja

16^{10h}-16^{30h}

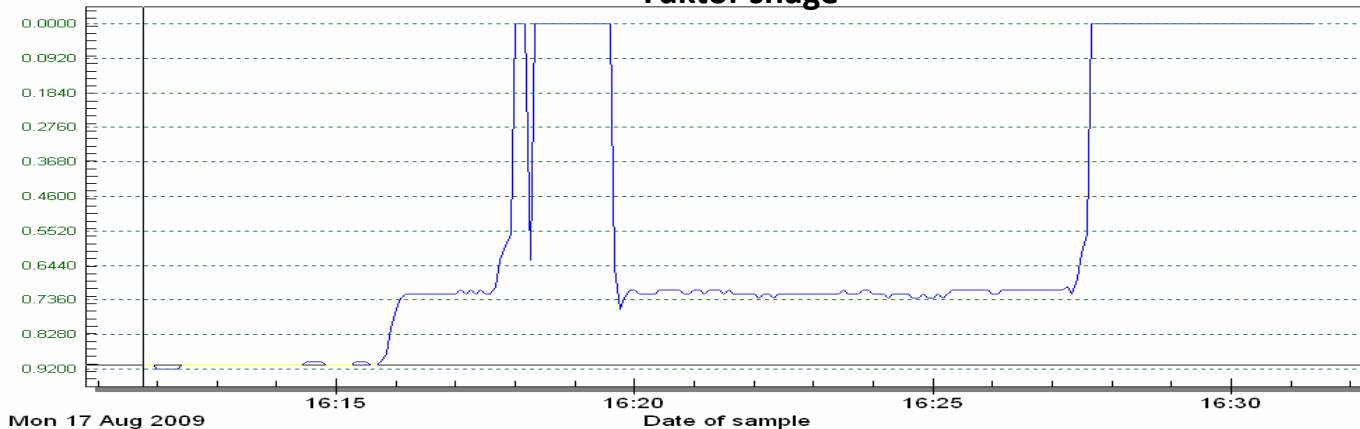
Napomena: Crvenom bojom su označeni uključeni motori (dva motora za 1 pogonski bubanj – pogon okreta). Ova jednopolna šema odgovara prethodnom slajdu.

Efektivne vrednosti struje i faktor snage sekundara -T1 [1]

Efektivna vrednost struja primara



Faktor snage



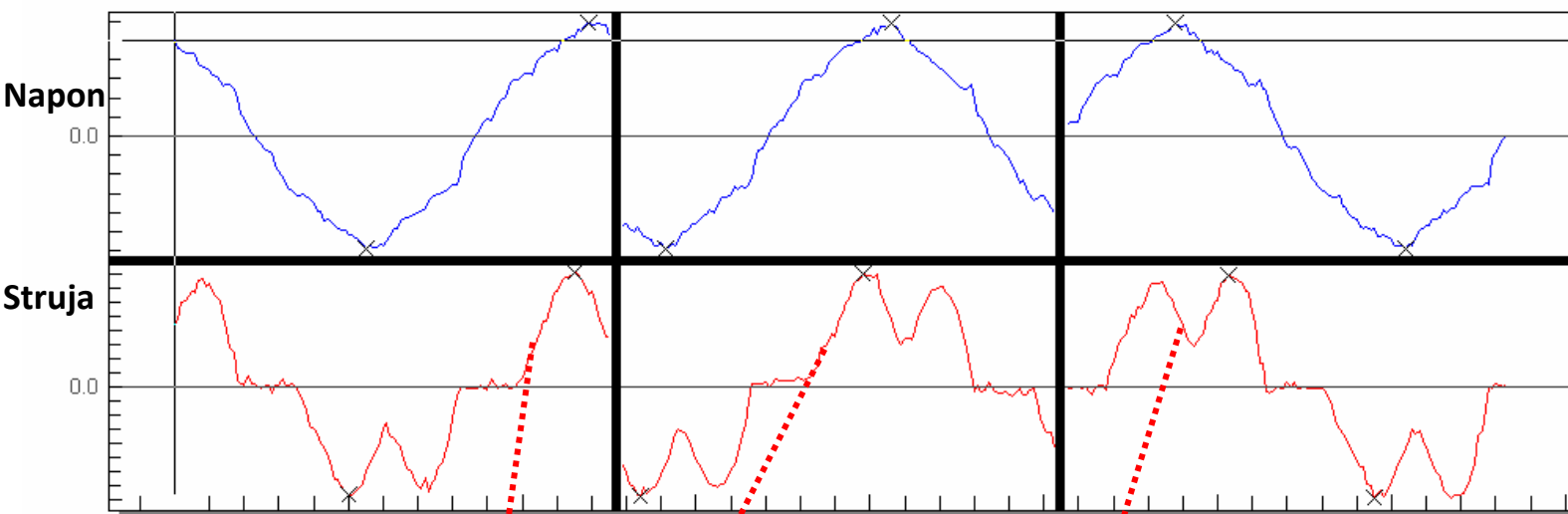
Talasnici napona i struja sekundara transformatora -T1 [1]

17.8.2009 16:13:20

Vn F1: 379 (V)
THD: 7.1 %
Maximum: 578 (V)
Minimum: -580 (V)

Vn F2: 382 (V)
THD: 7.0 %
Maximum: 589 (V)
Minimum: -586 (V)

Vn F3: 382 (V)
THD: 7.5 %
Maximum: 590 (V)
Minimum: -591 (V)



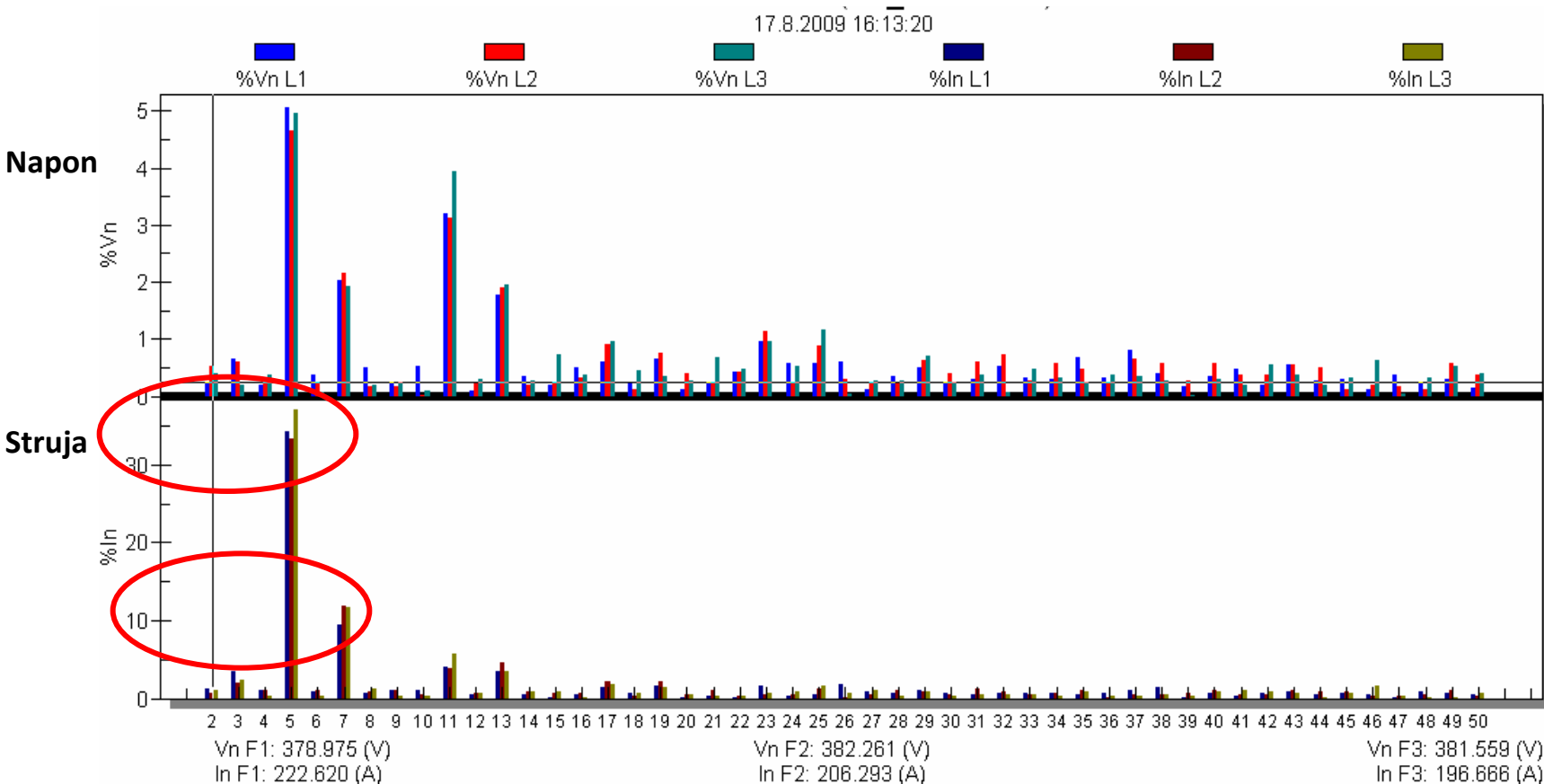
In F1: 223 (A)
THD: 34.2 %
Maximum: 407 (A)
Minimum: -385 (A)

In F2: 206 (A)
THD: 34.1 %
Maximum: 376 (A)
Minimum: -367 (A)

In F3: 197 (A)
THD: 36.9 %
Maximum: 351 (A)
Minimum: -356 (A)

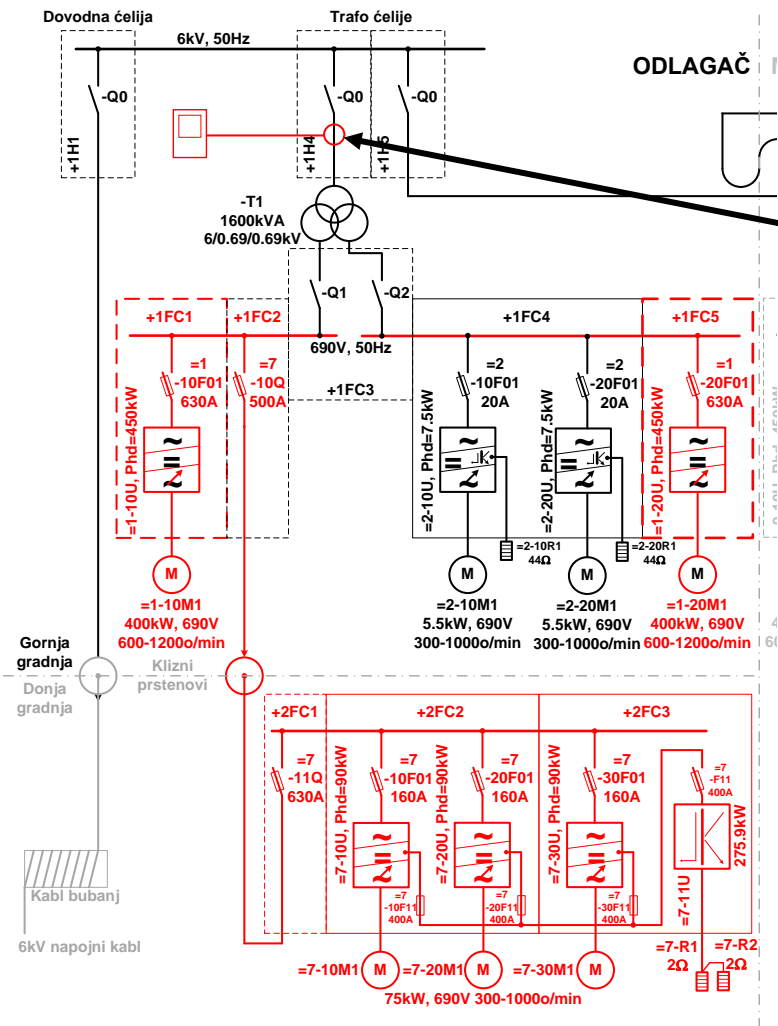
Izobličenja talasnog oblika faznih struja sekundara

Naponski i strujni harmonici na sekundaru transformatora -T1[1]



12- pulsna veza dva 6-pulsna mosta

Odlagač ARs 2000 – Primar transformatora [1]



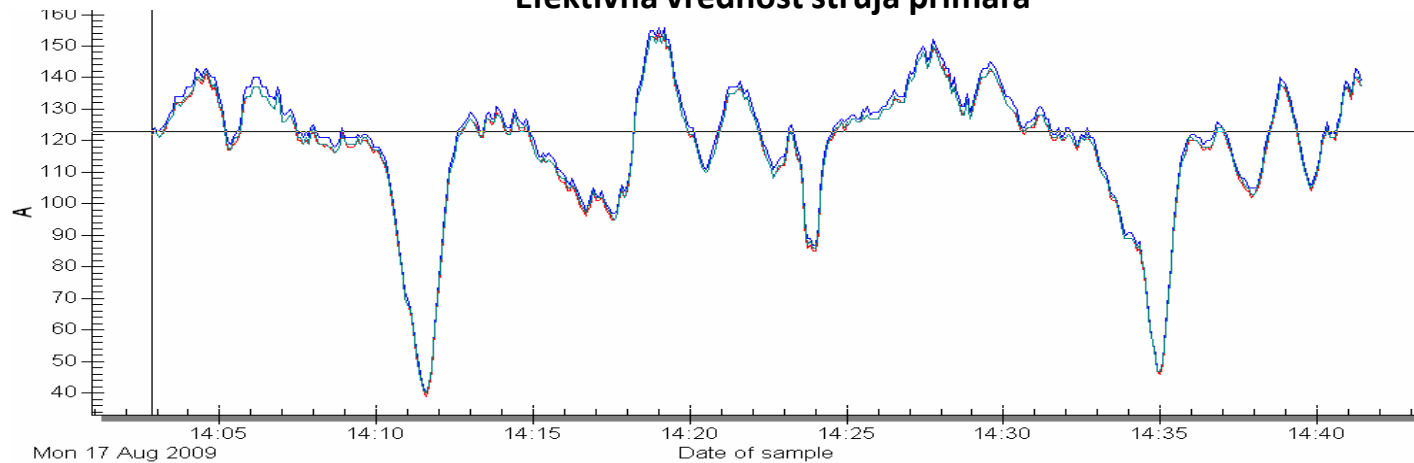
Merna tačka 2

Vreme snimanja

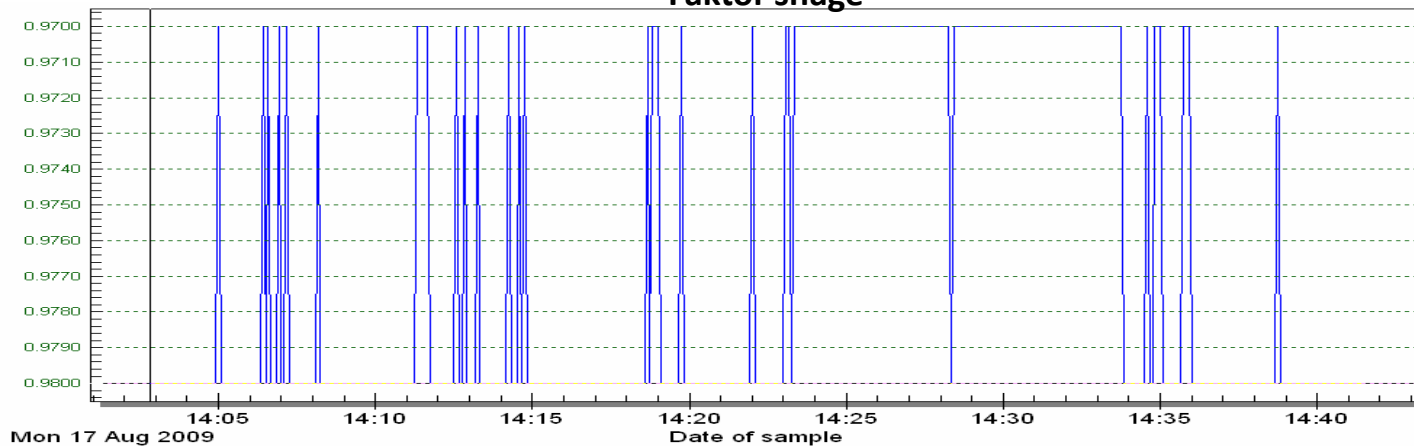
14⁰³h-16⁴³h

Efektivne vrednosti struje i faktor snage primara -T1 [1]

Efektivna vrednost struja primara



Faktor snage



Talasnici napona i struja primara transformatora -T1 [1]

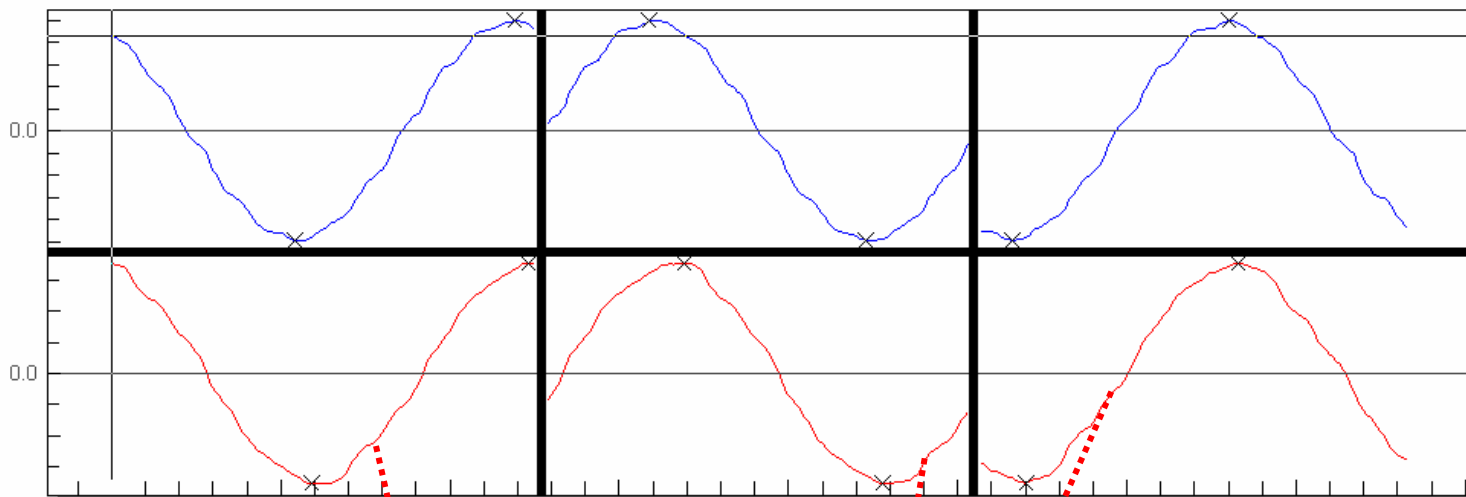
17.8.2009 14:05:30

Vn F1: 3443 (V)
THD: 3.4 %
Maximum: 4980 (V)
Minimum: -4920 (V)

Vn F2: 3434 (V)
THD: 3.5 %
Maximum: 4920 (V)
Minimum: -4920 (V)

Vn F3: 3447 (V)
THD: 3.6 %
Maximum: 4980 (V)
Minimum: -4980 (V)

Napon



Struja

In F1: 123 (A)
THD: 4.1 %
Maximum: 176 (A)
Minimum: -177 (A)

In F2: 119 (A)
THD: 4.3 %
Maximum: 170 (A)
Minimum: -171 (A)

In F3: 122 (A)
THD: 4.3 %
Maximum: 176 (A)
Minimum: -176 (A)

Act : 4260 (V)

Maximum : 4980 (V)

Minimum : -4920 (V)

Bez izobličenja talasnog oblika struje primara

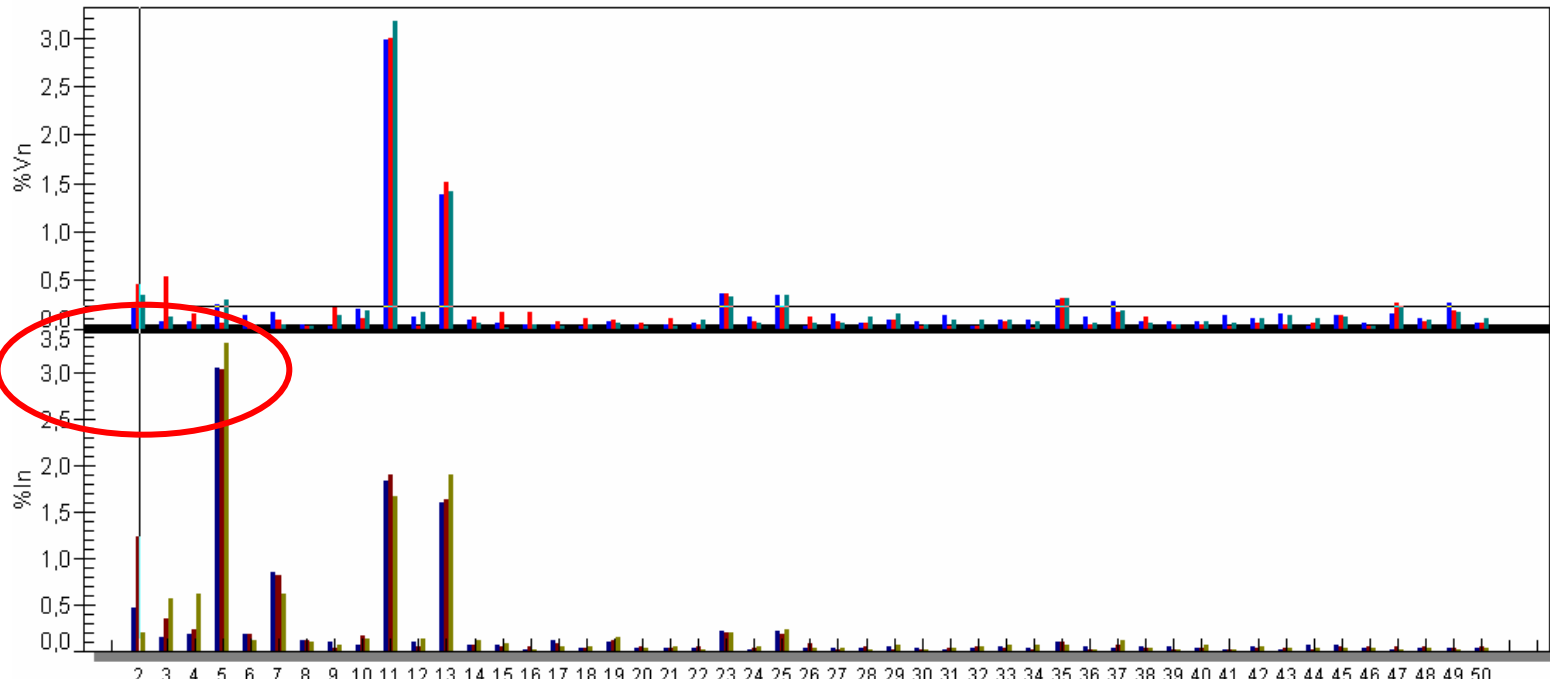
Naponski i strujni harmonici na primaru transformatora -T1 [1]

17.8.2009 14:05:30

■ %Vn L1 ■ %Vn L2 ■ %Vn L3 ■ %In L1 ■ %In L2 ■ %In L3

Napon

Struja



Vn F1: 3442.791 (V)
In F1: 123.294 (A)

Vn F2: 3433.969 (V)
In F2: 119.208 (A)

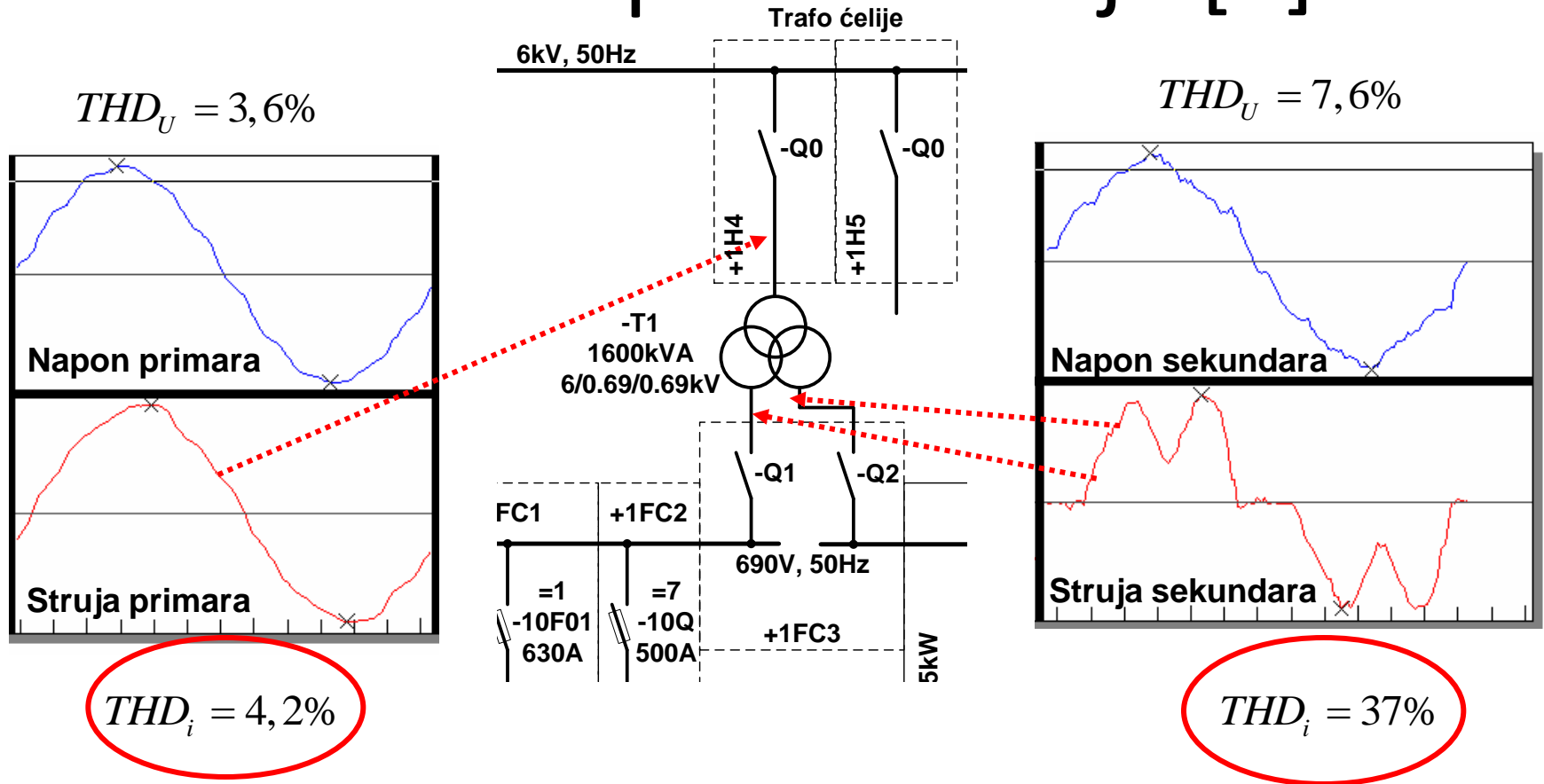
Vn F3: 3447.414 (V)
In F3: 121.702 (A)

Selected Variable: %Vn L1
From : 2
Maximum : 2.979 (%Vn)

Act: 2
Act: 0.230 (%Vn)

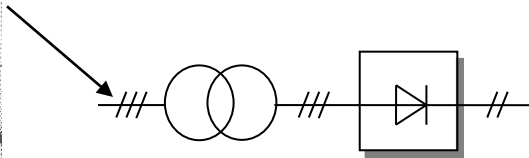
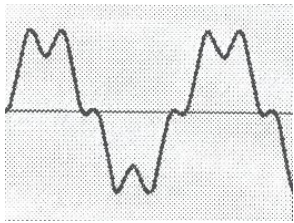
To: 50
Minimum: 0.019 (%Vn)

Poređenje izmerenih talasnih oblika napona i struje [1]



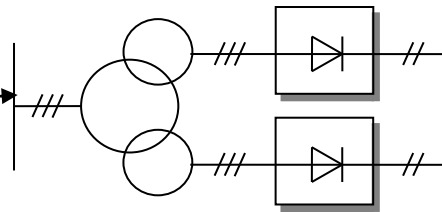
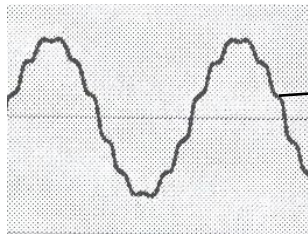
Bez izobličenja talasnog oblika struje primara

Poređenje različitih konfiguracija pretvarača [4]



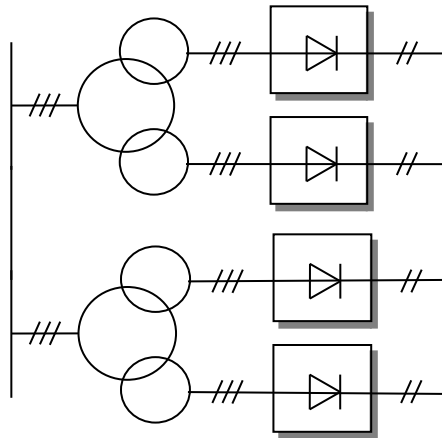
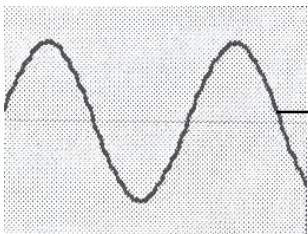
6-pulsni ispravljáč

- Ispravljáčko kolo kod 3-faznih pretvarača je 6-impulsni diodni most.
- Sastoji se od šest neupravljivih poluprovodnika (dioda),



12-pulsni ispravljáč

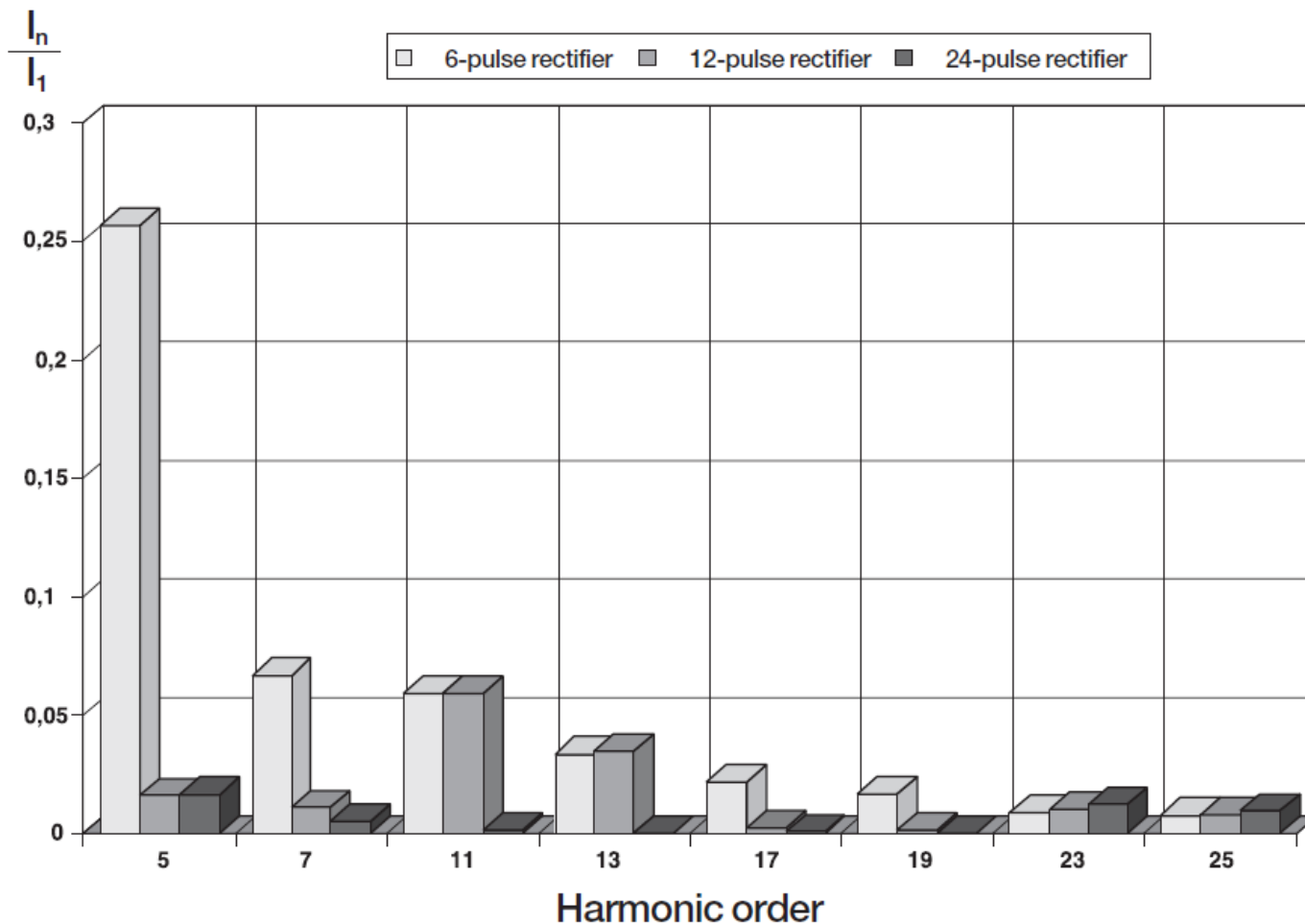
- Dva 6-impulsna ispravljáča u paraleli za napajanje zajedničkog jednosmernog kola.
- Napajanje iz tronamotajnog transformatora sa faznim pomerajem sekundara od 30° .
- eliminacija 5 i 7 harmonika**



24-pulsni ispravljáč

- Dva 12-impulsna ispravljáča u paraleli za napajanje zajedničkog jednosmernog kola.
- Napajanje iz dva tronamotajna transformatora sa faznim pomerajem sekundara od 15° .
- eliminacija 5, 7, i 11, 13 harmonika**

Harmonijske komponente kod različitih konfiguracija ispravljača [2]



Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]

Spektar signala:

- Spektar je način predstavljanja signala u frekvencijskom domenu.
- Rad u frekvencijskom domenu nosi sa sobom određene pogodnosti, zbog kojih je veoma zastupljen.
- Za dobijanje spektra koristi se Furijeova (Fourier) transformacija diskretnih signala. Furijeova transformacija diskretnih signala je kontinualna funkcija i samim tim je od većeg značaja u analitičkoj analizi signala.
- U realnim aplikacijama, kada se spektar procenjuje na osnovu odbiraka signala, veći praktičan značaj ima diskretna Furijeova transformacija DFT, koja se dobija diskretizacijom (u spektru) Furijeove transformacije.
- U nastavku će biti reči i o izračunavanju i predstavljanju spektra signala. Računanje spektra signala (DFT-a) podrazumeva određivanje amplitudskog i faznog spektra:

$$X = \text{fft}(x, N);$$

$$M = \text{abs}(X);$$

$$P = \text{angle}(X);$$

gde je:

x – niz odbiraka signala za koji se računa spektar

N – broj tačaka u kojima se računa spektar

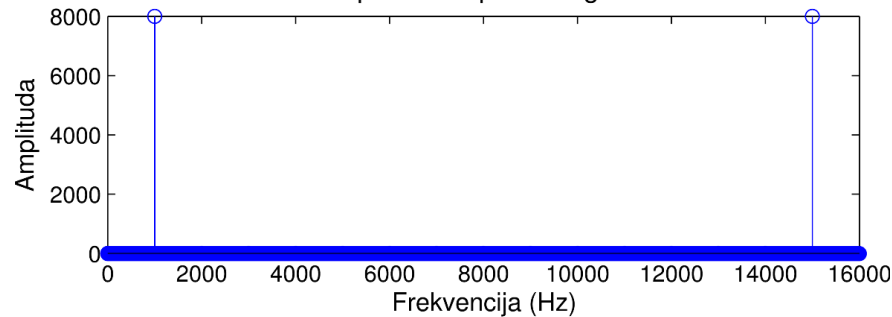
X – kompleksni dvostrani spektar signala

M – amplitudski spektar signala

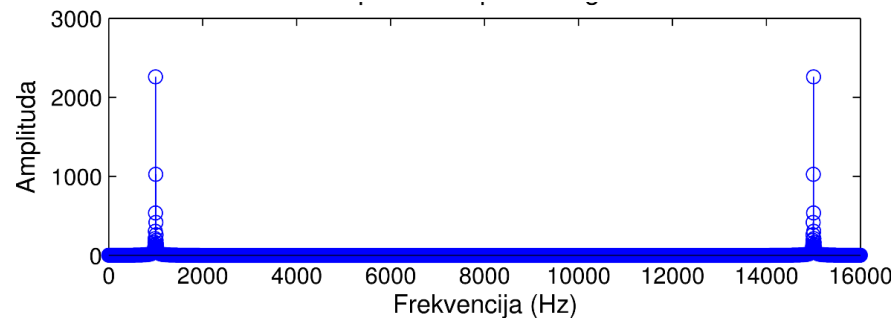
P – fazni spektar signala

Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]

- Dužina spektra zavisi od broja tačaka u kojima je on računat. Izbor broja tačaka zavisi od konkretne situacije i odražava se na pojavu „curenja“ spektra.
- Na Slici 1. je predstavljen primer u kome nema pojave curenja, dok je na Slici 2. ilustrovan primer u kome se javlja curenje kao posledica lošeg izbora broja tačaka.



Slika 1: Spektar signala u kome nema pojave curenja



Slika 2: Spektar signala u kome postoji curenje

Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]

- Loš izbor broja N se odražava na dobijanje netačnih podataka za vrednosti amplitude, faze i frekvencije komponente signala. Da ne bi bilo curenja, za svaku frekvencijsku komponentu signala f_1, f_2, \dots, f_n treba da postoje celi brojevi k_1, k_2, \dots, k_n , tako da važi:

$$f_n = k_n \cdot \Delta f \quad f_s - \text{frekvencija odabiranja}$$

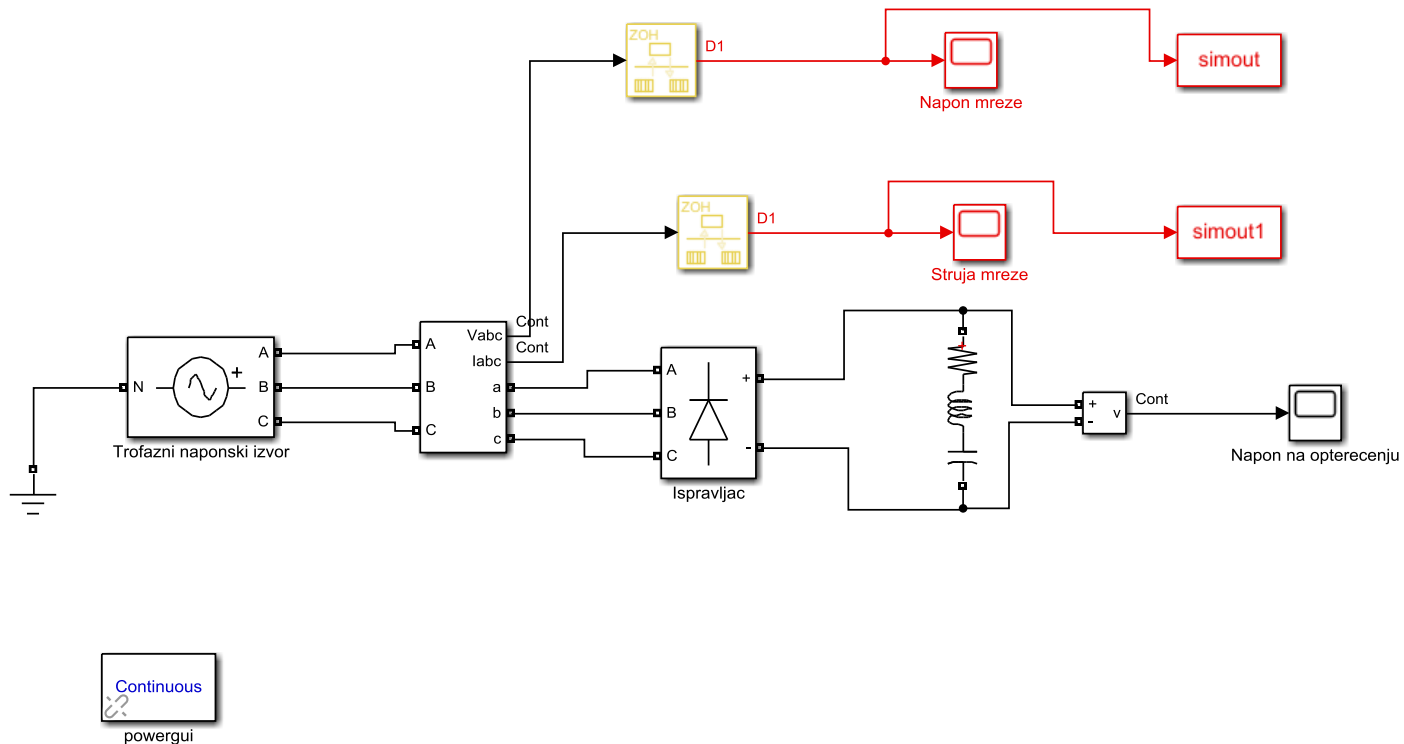
$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad \Delta f - \text{frekvencijska rezolucija}$$

-Kada se radi analiza signala poznatih frekvencija, može se izabrati broj N , tako da gornje relacije važe za sve komponente od interesa u spektru.

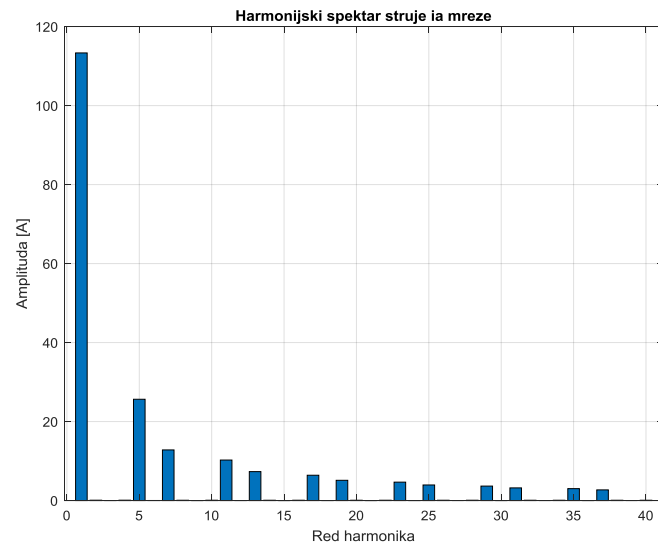
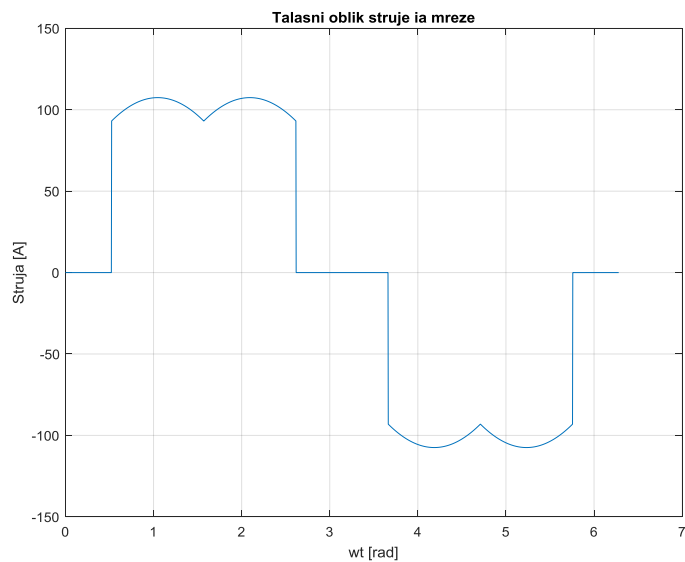
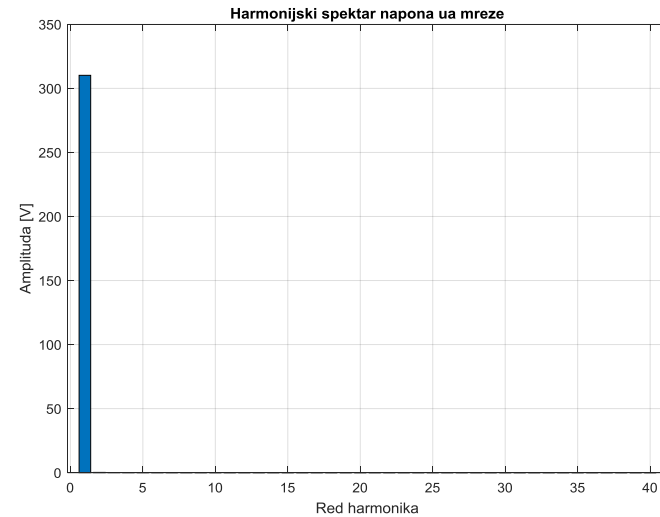
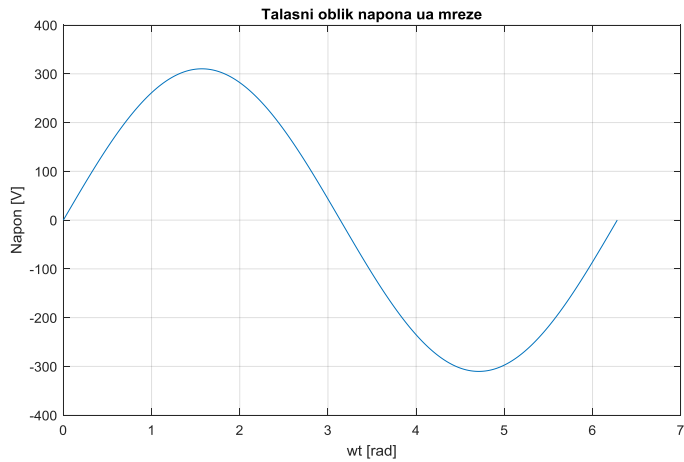
- Prikaz spektra signala u *Matlab*-u se vrši pomoću funkcije *stem(n,x)*, koja se koristi za dvodimenzioni prikaz diskretnih vrednosti. Pri tome je n niz kojim se definiše x – osa (može biti vreme/frekvencija), dok je x niz kojim se definiše y – osa (može biti amplituda/nivo signala) pravouglog koordinatnog sistema. Uputstvo za sva detaljna podešavanja izgleda grafika nalazi se u odeljku „help“ *Matlab*-a. Analogno prikazu diskretnih signala se mogu prikazati i kontinualni, pomoću funkcije *plot(t,x)*, gde se t definiše analogno definiciji niza n kod funkcije za prikaz diskretnih signala.

Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]

- Za trofazni diodni most sa otpornikom kao opterećenjem treba izvršiti harmonijsku analizu struja u slučaju da se napaja iz mreže sa idealno prostoperiodičnim naponima. Najpre je izvršena simulacija rada posmatranog ispravljača u *Simulink*-u. Vrednosti napona i struje na strani mreže dobijene u simulaciji dalje su korišćene za analizu uz pomoć *Matlab* koda.



Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]

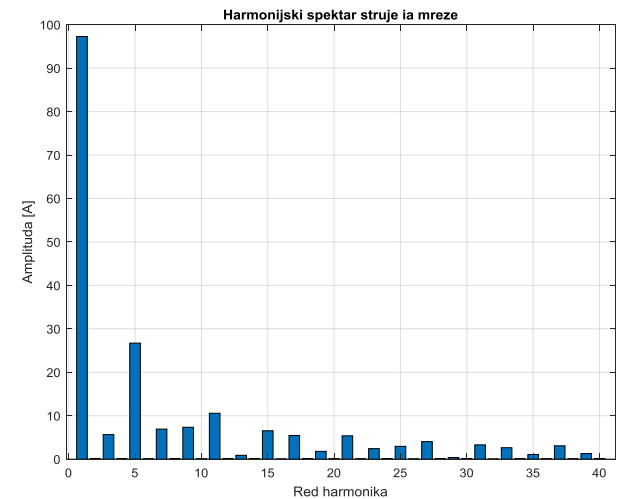
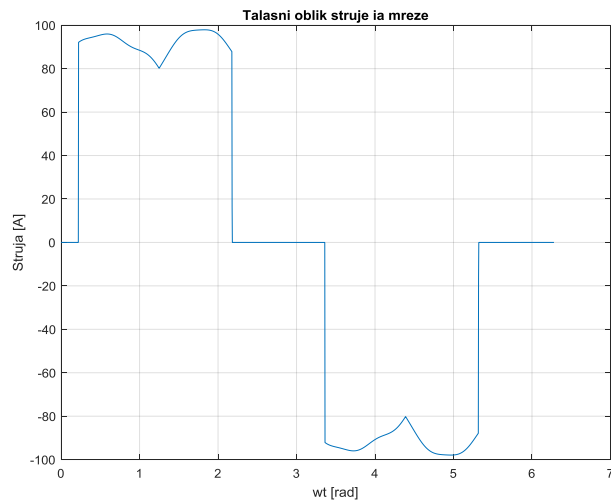
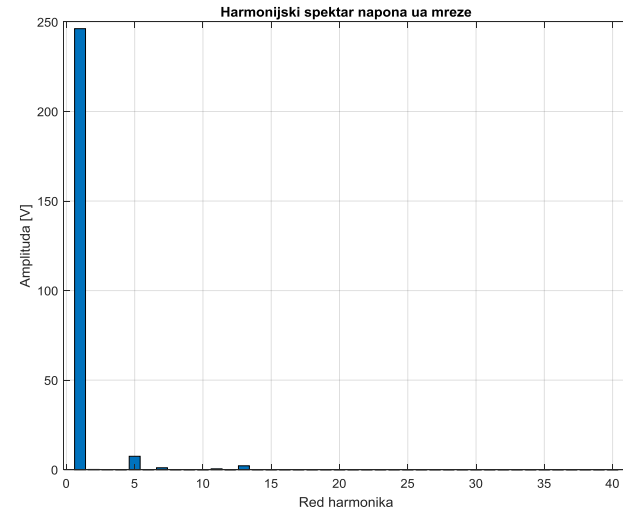
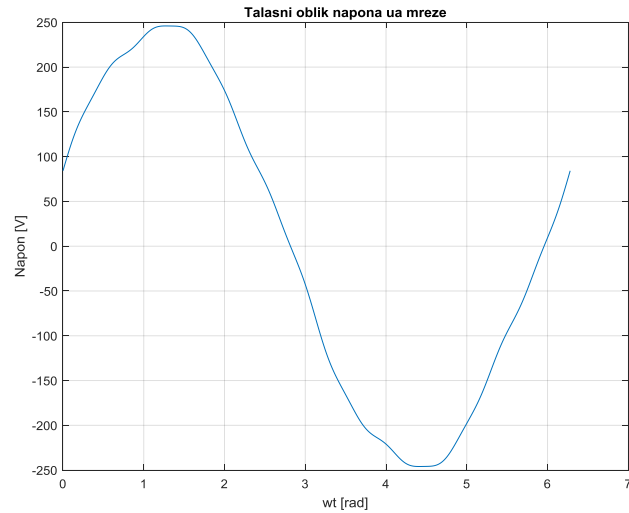


Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]

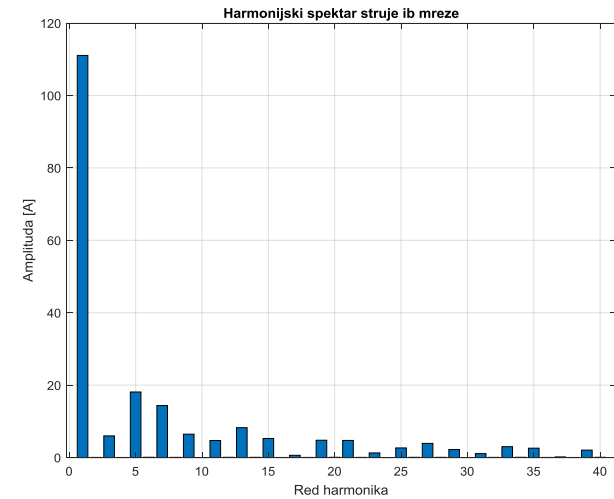
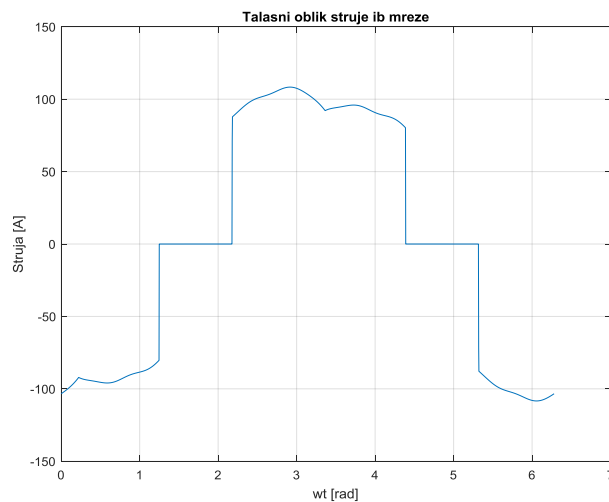
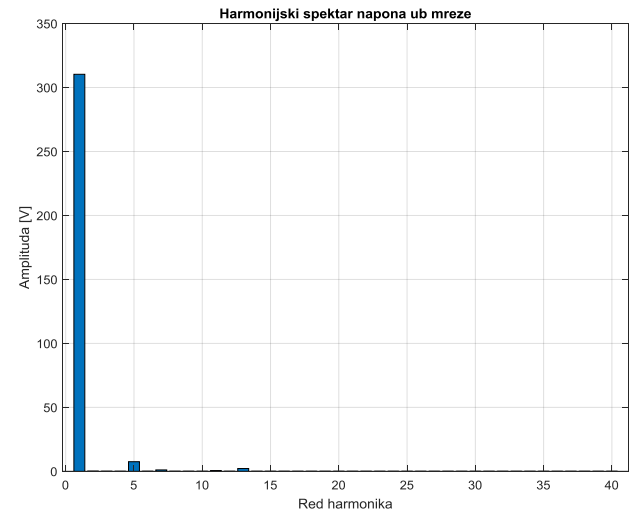
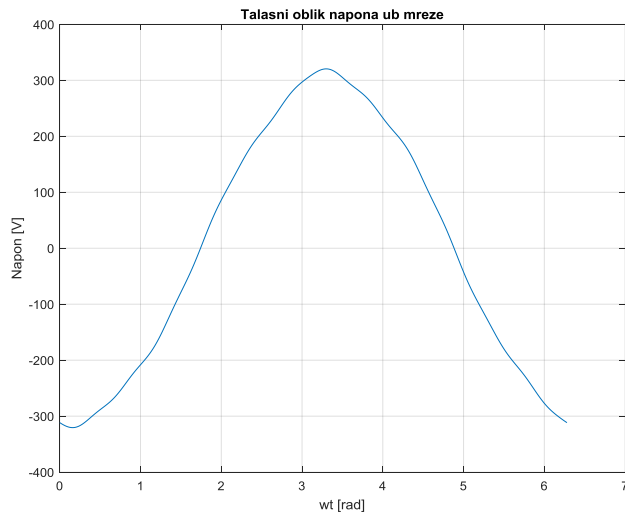
Veličina [jedinica]	Vrednost
Aktivna snaga prvog harmonika faze A [W]	17578.21
Aktivna snaga prvog harmonika faze B [W]	17586.22
Aktivna snaga prvog harmonika faze C [W]	17586.22
Reaktivna snaga prvog harmonika faze A [VAr]	0
Reaktivna snaga prvog harmonika faze B [VAr]	2.984
Reaktivna snaga prvog harmonika faze C [VAr]	-2.984
Prividna snaga prvog harmonika faze A [VA]	17578.21
Prividna snaga prvog harmonika faze B [VA]	17586.22
Prividna snaga prvog harmonika faze C [VA]	17586.22
Ukupna aktivna snaga faze A [W]:	17579.16
Ukupna aktivna snaga faze B [W]:	17586.38
Ukupna aktivna snaga faze C [W]:	17586.38
Ukupna reaktivna snaga faze A [VAr]:	0
Ukupna reaktivna snaga faze B [VAr]:	3.28
Ukupna reaktivna snaga faze C [VAr]:	-3.28
Ukupna prividna snaga faze A [VA]:	18332.42
Ukupna prividna snaga faze B [VA]:	18341.03
Ukupna prividna snaga faze C [VA]:	18341.03
Snaga distorzije faze A [VA]:	5201.05
Snaga distorzije faze B [VA]:	5206.97
Snaga distorzije faze C [VA]:	5206.97

Veličina [jedinica]	Vrednost
Faktor izobličenja struje ia mreže:	0.9588593
Faktor izobličenja struje ib mreže:	0.9588503
Faktor izobličenja struje ic mreže:	0.9588430
Faktor izobličenja napona ua mreže:	0.9999996
Faktor izobličenja napona ub mreže:	1.000001
Faktor izobličenja napona uc mreže:	0.9999984
Totalna harmonijska distorzija struje ia mreže:	0.2960621
Totalna harmonijska distorzija struje ib mreže:	0.2961104
Totalna harmonijska distorzija struje ic mreže:	0.2961104
Totalna harmonijska distorzija napona ua mreže:	0.0009279434
Totalna harmonijska distorzija napona ub mreže:	0.0005625518
Totalna harmonijska distorzija napona uc mreže:	0.0005625518
Faktor pomeraja za fazu A:	1.000000
Faktor pomeraja za fazu B:	1.000000
Faktor pomeraja za fazu C:	1.000000
Faktor snage za fazu A:	0.9588589
Faktor snage za fazu B:	0.9588515
Faktor snage za fazu C:	0.9588415
Srednja snaga faze A [W]:	17578.21
Srednja snaga faze B [W]:	17586.32
Srednja snaga faze C [W]:	17586.14

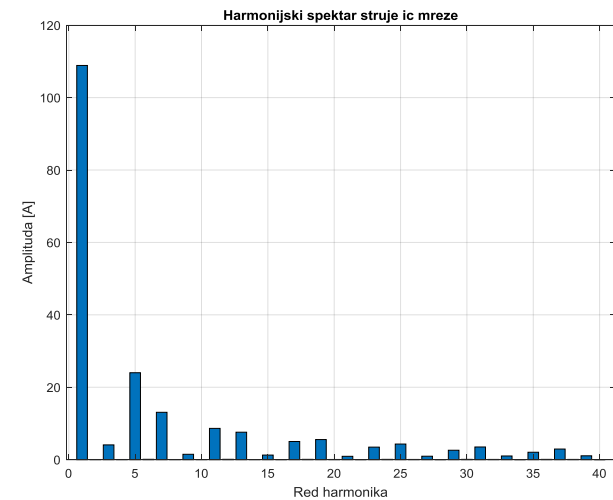
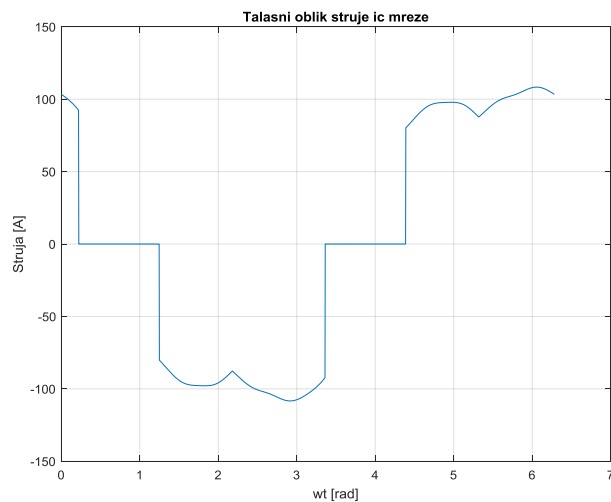
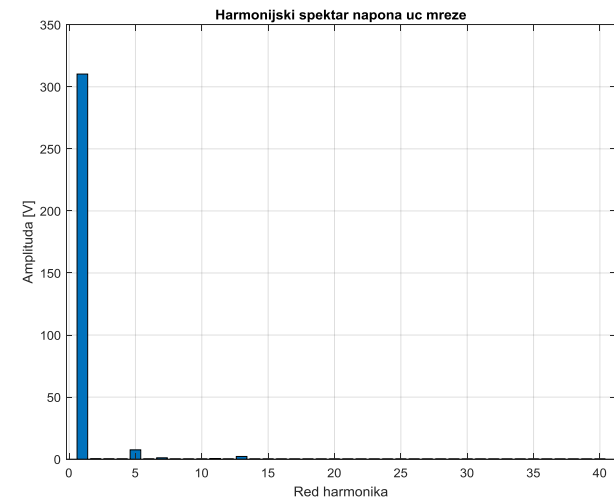
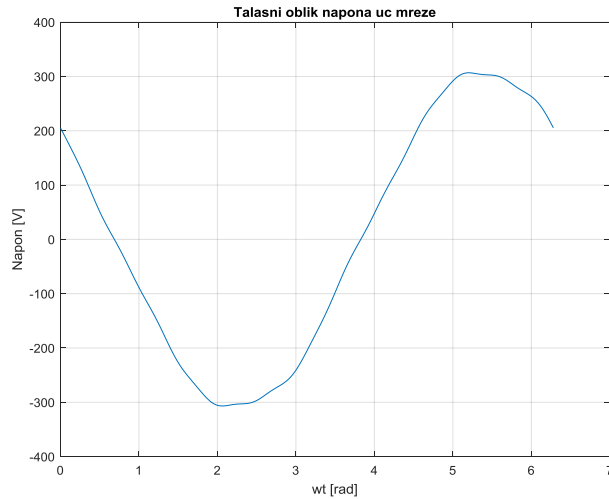
Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]



Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]



Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]



Primer: određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača [5,6,7]

Veličina [jedinica]	Vrednost
Aktivna snaga prvog harmonika faze A [W]	11974.94
Aktivna snaga prvog harmonika faze B [W]	17201.65
Aktivna snaga prvog harmonika faze C [W]	16852.18
Reaktivna snaga prvog harmonika faze A [VAr]	-211.0687
Reaktivna snaga prvog harmonika faze B [VAr]	-1085.744
Reaktivna snaga prvog harmonika faze C [VAr]	1143.056
Prividna snaga prvog harmonika faze A [VA]	11976.80
Prividna snaga prvog harmonika faze B [VA]	17235.88
Prividna snaga prvog harmonika faze C [VA]	16890.90
Ukupna aktivna snaga faze A [W]:	12007.56
Ukupna aktivna snaga faze B [W]:	17148.70
Ukupna aktivna snaga faze C [W]:	16933.95
Ukupna reaktivna snaga faze A [VAr]:	-111.0944
Ukupna reaktivna snaga faze B [VAr]:	-1105.966
Ukupna reaktivna snaga faze C [VAr]:	1098.246
Ukupna prividna snaga faze A [VA]:	12675.36
Ukupna prividna snaga faze B [VA]:	17809.37
Ukupna prividna snaga faze C [VA]:	17609.62
Snaga distorzije faze A [VA]:	4058.437
Snaga distorzije faze B [VA]:	4676.782
Snaga distorzije faze C [VA]:	4704.694

Veličina [jedinica]	Vrednost
Faktor izobličenja struje ia mreže:	0.9453734
Faktor izobličenja struje ib mreže: 9.588503e-01	0.9681189
Faktor izobličenja struje ic mreže: 9.588430e-01	0.9594944
Faktor izobličenja napona ua mreže:	0.9994859
Faktor izobličenja napona ub mreže:	0.9996751
Faktor izobličenja napona uc mreže:	0.9996736
Totalna harmonijska distorzija struje ia mreže:	0.3448260
Totalna harmonijska distorzija struje ib mreže:	0.2587564
Totalna harmonijska distorzija struje ic mreže:	0.2936063
Totalna harmonijska distorzija napona ua mreže:	0.03205520
Totalna harmonijska distorzija napona ub mreže:	0.02555920
Totalna harmonijska distorzija napona uc mreže:	0.02551394
Faktor pomeraja za fazu A:	0.9998447
Faktor pomeraja za fazu B:	0.9980140
Faktor pomeraja za fazu C:	0.9977076
Faktor snage za fazu A:	0.9447407
Faktor snage za fazu B:	0.9658822
Faktor snage za fazu C:	0.9569823
Srednja snaga faze A [W]:	11974.93
Srednja snaga faze B [W]:	17201.75
Srednja snaga faze C [W]:	16852.10

Literatura:

- [1] Projekat i puštanje u rad odlagača ARs 2000 na PK Drmno - Elektro deo, Laboratorija za elektromotorne pogone, ETF Beograd, 2007-2008. god
- [2] ABB, Guide to Harmonics with AC Drives, Technical Guide No. 6, 2002.
- [3] David E. Rice, "A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Currents", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 30, NO. 2, MARCH-APRIL 1994.
- [4] B. Jeftenić, M. Bebić, "Energetska efikasnost kod elektromotornih pogona" u izdanju MEEIS-a, 2005. (http://www.energetska-efikasnost.ba/Publikacije/Literatura/MREZA_ZA_ENERGETSKU_EFIKASNOST_U_INDUSTRIJI_SRBIJE.pdf)
- [5] Miloš Bjelić, "Spektralna analiza diskretnih signala", Laboratorija za akustiku, predavanje po pozivu, ETF, Beograd 2019.
- [6] Nevena Paramentić, "NAČINI ZA UBLAŽAVANJE HARMONIKA U INDUSTRIJSKIM APLIKACIJAMA SA REGULISANIM ELEKTROMOTORNIM POGONIMA" , master rad, ETF, Beograd, septembar 2020.
- [7] Stefan Subotić, "Određivanje spektra signala i izračunavanje karakterističnih veličina u slučaju trofaznog diodnog mosta kao nelinearnog potrošača ", semestralni rad iz EEF pogona, ETF, Beograd, januar 2021.