

Elektroenergetske mreže

Kvaliteta električne energije

Kvaliteta opskrbe električne energije

- Kvaliteta napona – jedno od mjerila kvalitete opskrbe električne energije
- Osnovni pokazatelji kvalitete napona
 - iznos napona
 - simetričnost napona
 - oblik (sinusoidalnost) napona
 - titranje napona (flikeri)
 - frekvencija napona

Norme vezane uz kvalitetu napona

- Međunarodne organizacije:
 - IEC (krovna međunarodna organizacija)
 - CENELEC (europska)
 - IEEE (Amerika, Afrika, Australija, ...)
- Norme i preporuke:
 - IEC 61000-x-x (više preporuka za različita područja iz kvalitete napona)
 - EN 50160 (europska norma za napone do 35 kV)
 - IEEE 519 (preporuke za sve naponske razine)
 - CIGRE (preporuke za neka područja)

EN 50160

- Mjerni period: 7 dana (168 sati bez prestanka)
- Mjerni intervali za sve pokazatelje osim frekvencije – 10 min. (za cijeli tjedan ukupno 1008 10-min. intervala)
- Mjerni intervali za frekvenciju – 10 sek.
- Norma zahtijeva da mjerene vrijednosti budu u dozvoljenim granicama za 95% tjednih vrijednosti (osim za frekvenciju – 99,5% tjedna)
- Za preostalih 5% tjedna, odnosno 0,5% tjedna za frekvenciju dozvoljavaju se i veća odstupanja

Iznos napona

- Utjecaj odstupanja napona na potrošače

Rasvjeta (žarulje sa žarnom niti)

+5% $U_n \rightarrow +20\%$ svj.tok \rightarrow cca. 2 puta smanjena životna dob

+10% $U_n \rightarrow +30\%$ svj.tok \rightarrow cca. 3 puta smanjena životna dob

-5% $U_n \rightarrow -20\%$ svj.tok \rightarrow povećana životna dob

+10% $U_n \rightarrow -30\%$ svj.tok \rightarrow cca. 2 puta povećana životna dob

Asinkroni motori (konstantna djelatna snaga)

+10% $U_n \rightarrow +21\%$ moment, -10% struja statora

(veći gubici u željezu, pada korisnost)

-10% $U_n \rightarrow -19\%$ moment, +10% struja statora

(veći gubici u bakru, pada korisnost)

Grijači (toplina proporcionalna kvadratu napona)

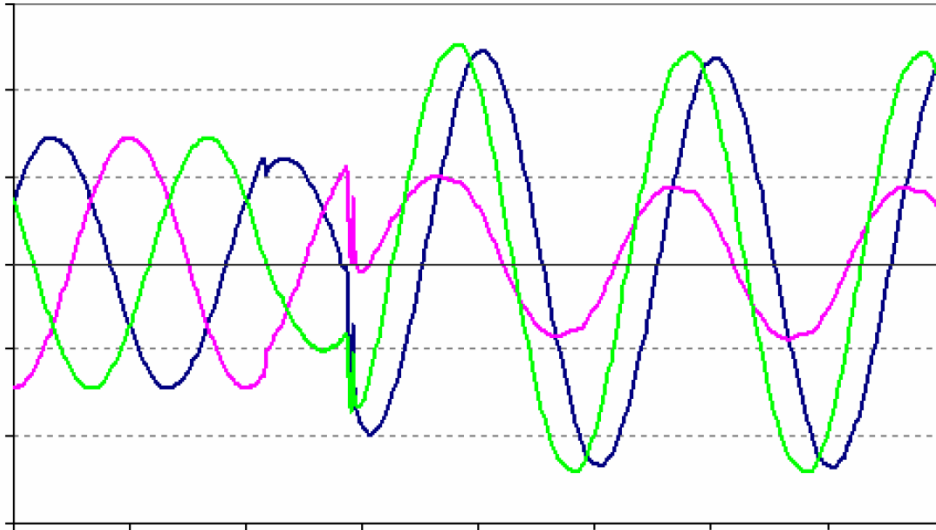
Kondenzatorske baterije ($Q \sim U^2$)

Iznos napona

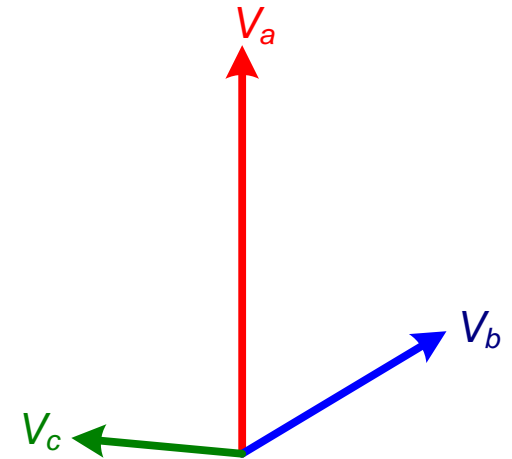
Odstupanje napona: $\Delta U \% = \frac{|U_k| - U_n}{U_n} \cdot 100\%$

- EN 50160 (do 35 kV)
 - $\pm 10\% U_n$ (95% tjedna)
 - +10% U_n , -15% U_n (5% tjedna)
- Za VN (110, 220, 400 kV) $\pm 10\% U_n$
- Za VVN (iznad 500 kV) $\pm 5\% U_n$

Nesimetrija napona



a)



b)

Primjer nesimetričnog trofaznog napona u:

- a) vremenskoj domeni
- b) fazorskoj (vektorskoj) domeni

Nesimetrija napona

- Uzroci:
 - jednofazni potrošači (elektrolučne i indukcijske peći, neravnomjerna raspodjela jednofaznih potrošača po fazama)
 - dvofazni potrošači (željeznica)
 - ostali nesimetrični trofazni potrošači
 - nesimetričan raspored vodiča na vodu (neprepletenost)
 - prekid jedne faze
 - transformatori i generatori (u manjoj mjeri)
- Posljedice:
 - pojava inverznog okretnog magnetskog polja kod sinkronih strojeva (generatori, motori) – dodatno zagrijavanje rotora
 - povećanje gubitaka

Nesimetrija napona

Faktori nesimetrije:

- omjer inverzne i direktne komponente napona ili
- omjer inverzne komponente i nazivnog napona

Prema EN 50160 (do 35 kV):

$$\varepsilon_i \% = \frac{|V_i|}{|V_d|} \cdot 100\% = \frac{|V_a + a^2 V_b + a V_c|}{|V_a + a V_b + a^2 V_c|} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_0 \% = \frac{|V_0|}{|V_d|} \cdot 100\% = \frac{|V_a + V_b + V_c|}{|V_a + a V_b + a^2 V_c|} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_i \% \leq 2\% \text{ (u izuzetnim prilikama 3\%)} \qquad \varepsilon_0 \% \leq 2\%$$

$$\text{Za VN (prema preporukama CIGRE):} \qquad \varepsilon_i \% \leq 1,5\%$$

Strujna nesimetrija (inverzna komponenta): 8-12%

Nesimetrija napona

Metode za proračun nesimetrija u mreži:

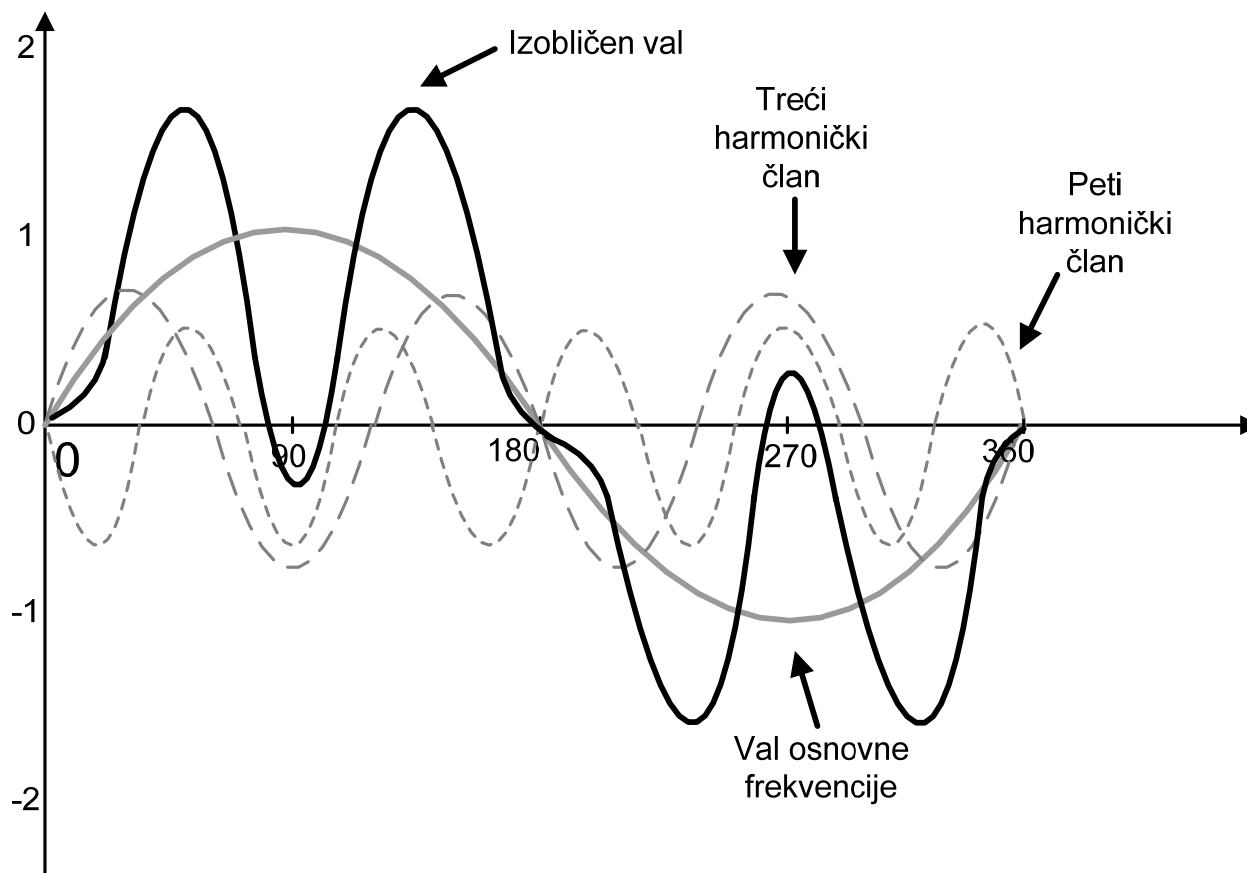
Približna metoda

- rastavljanjem nesimetričnog potrošača na jedan simetrični i dva međufazna potrošača
- pretvorba snaga u impedancije
- rješavanje problema kao dvopolni KS preko impedancije

Točna metoda

- trofazni model svih elemenata EES-a
- trofazni proračun tokova snaga (nesimetrične snage tereta)
- rezultat su nesimetrije napona i struja u cijeloj mreži

Sinusoidalnost napona



Harmoniĉko izobliĉenje osnovnog sinusnog vala
trećim i petim harmonikom

Sinusoidalnost napona

Za harmonik ranga h vrijedi: $\vec{V}_{ah} = V_h e^{jh\omega t}$

$$\vec{V}_{bh} = V_h e^{jh(\omega t - \frac{2\pi}{3})}$$

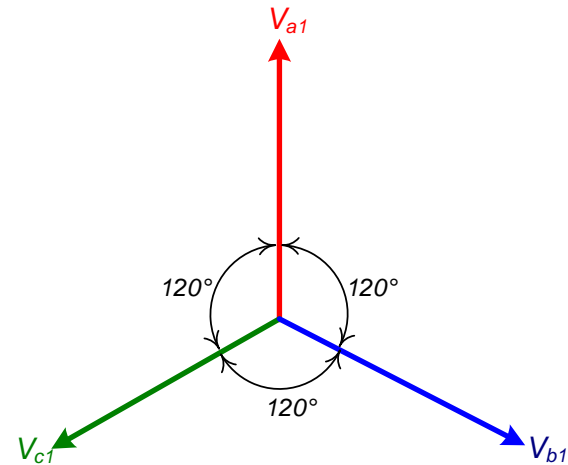
$$\vec{V}_{ch} = V_h e^{jh(\omega t - \frac{4\pi}{3})}$$

Za osnovni (prvi) harmonik vrijedi:

$$\vec{V}_{a1} = V_1 e^{j\omega t} = V_1 \cdot \sin \omega t$$

$$\vec{V}_{b1} = V_1 e^{jh(\omega t - \frac{2\pi}{3})} = V_1 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$\vec{V}_{c1} = V_1 e^{jh(\omega t - \frac{4\pi}{3})} = V_1 \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)$$



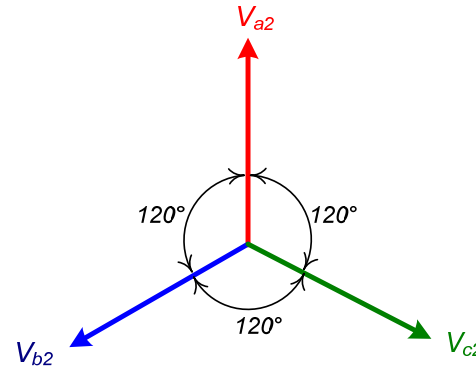
Sinusoidalnost napona

Za drugi harmonik vrijedi:

$$\vec{V}_{a2} = V_2 \cdot \sin 2\omega t$$

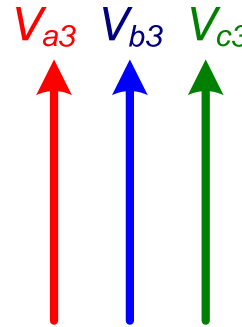
$$\vec{V}_{b2} = V_2 \cdot \sin(2\omega t - 240^\circ)$$

$$\vec{V}_{c2} = V_2 \cdot \sin(2\omega t - 120^\circ)$$



Za treći harmonik vrijedi:

$$\vec{V}_{a3} = \vec{V}_{b3} = \vec{V}_{c3} = V_3 \cdot \sin 3\omega t$$



Direktni sustav tvore harmonici: $3k+1$

Inverzni sustav tvore harmonici: $3k-1$

Nulti sustav tvore harmonici: $3k$

Sinusoidalnost napona

Podjela u tri skupine:

1) Parni

- smetnje identične na obje poluperiode (poluvalni ispravljači, elektrolučne peći)
- rijetko se pojavljuju, ali imaju teške posljedice

2) Djeljivi s 3

- pri magnetiziranju zasićenih jezgri
- zatvaraju se kroz mjesta gdje je nulti sustav spojen na nulu sustava
- namoti transformatora spojeni u trokut omogućuju cirkulaciju trećeg harmonika

3) Ostali (neparni koji tvore direktni ili inverzni sustav)

- najzastupljeniji su

Sinusoidalnost napona

- Uzroci:
Nelinearni tereti
 - uređaji energetske elektronike
 - statički kompenzatori
 - elektrovučna postrojenja
 - elektrolučne peći
 - uređaji široke potrošnje priključeni na NN (fluorescentna rasvjeta, ...)
 - korona
- Posljedice:
 - povećanje gubitaka i dodatno zagrijavanje
 - pojava paralelne rezonancije (npr. kod kondenzatorskih baterija)
 - kriva prorada zaštitnih uređaja
 - smetnje na MTU uređajima
 - preopterećenje neutralnog vodiča

Sinusoidalnost napona

- Harmonijska analiza:
 - faktori naponskog izobličenja za svaki harmonik ($U_h\%$)
(relativni omjer amplitude harmonika h i osnovnog harmonika)
 - faktor ukupnog harmonijskog izobličenja (THD%)

$$THD_u = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}{U_1^2}} \cdot 100\%$$

EN 50160: $THD_u \leq 8\%$

Sinusoidalnost napona

Individualni faktori distorzije prema EN 50160

| NEPARNI HARMONICI | | | | PARNI HARMONICI | |
|--------------------|-----------|---------------|-----------|-----------------|-----------|
| nisu djeljivi sa 3 | | djeljivi sa 3 | | | |
| br. harmonika | limit u % | br. harmonika | limit u % | br. harmonika | limit u % |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,5 | 6-24 | 0,5 |
| 13 | 3 | 21 | 0,5 | | |
| 17 | 2 | | | | |
| 19 | 1,5 | | | | |
| 23 | 1,5 | | | | |
| 25 | 1,5 | | | | |

Sinusoidalnost napona

Model voda:

$$Z_{1h} = R_{1h} + jX_{1h} = R_1 \cdot g(h) + jh\omega L_1$$

$$Y_{1h} = jB_{1h} = jh\omega C_1$$

Model transformatora – frekvencijski ovisan

$$\begin{bmatrix} I_{1h} \\ I_{2h} \\ \dots \\ I_{nh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11h} & Y_{12h} & \dots & Y_{1nh} \\ Y_{21h} & Y_{22h} & \dots & Y_{2nh} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1h} & Y_{n2h} & \dots & Y_{nnh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1h} \\ V_{2h} \\ \dots \\ V_{nh} \end{bmatrix}$$

- rješavanje direktnom metodom
- u točnijim proračunima: iterativne metode

Titranje napona (flikeri)

- Brze promjene koje se mogu zamjetiti golim okom frekvencije 0,5-25 Hz (ljudskom oku najviše smetaju frekvencije 7-10 Hz)

Uzroci:

- pokretanje VN motora
- uključivanje/isključivanje velikih proizvodnih i prijenosnih jedinica
- kratki spojevi
- elektrolučne peći
- elektrolučno zavarivanje
- uređaji energetske elektronike

Posljedice:

- smanjenje životne dobi (rasvjeta, elektronički uređaji)
- problemi u radu nekih uređaja (elektronički regulatori, radio, TV, PC i dr.)

Titranje napona (flikeri)

Mjere za sprečavanje flikera:

- izbjegavanje priključka velikih trošila s impulsnim upravljanjem
- smanjenje potezne struje VN motora
- ograničenje struja k.s.
- primjena poprečnih i serijskih kondenzatora za "glačanje" napona
- kompenzacija jalove snage uređaja energetske elektronike
- pojačanje mreže (paralelne grane, veći presjek vodova i dr.)

Intenzitet:
$$\partial U \% = \frac{|U_{\max}| - |U_{\min}|}{U_n} \cdot 100\%$$

Svaki intenzitet veći od 1% je fliker

Srednja frekvencija pojavljivanja:
$$F = \frac{m}{T} \text{ , } m - \text{broj titranja} \text{ , } T - \text{vremenski period}$$

Titranje napona (flikeri)

EN 50160 propisuje u normalnim pogonskim uvjetima:

NN mreže: $\partial U \% \leq 5\% U_n$, $\partial U \% \leq 10\% U_n$ – *povremeno*

SN mreže: $\partial U \% \leq 4\% U_n$, $\partial U \% \leq 6\% U_n$ – *povremeno*

EN 50160 definira mjerenja flikera:

- Kratkotrajni fliker (P_{st}) – mjeren u periodu 10 min.
- Dugotrajni fliker (P_{lt}) – na temelju 12 izmjerenih vrijednosti kratkotrajnog flikera

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

$P_{lt} \leq 1\%$, tijekom 95% tjedna

Frekvencija napona

- Jedinstvena je za cijeli sustav, ali postoje razlike između udaljenih dijelova
- U normalnom pogonu dozvoljena odstupanja:
 - manja od $\pm 0,1$ Hz (za automatsku regulaciju)
 - manja od $\pm 0,2$ Hz (za ručnu regulaciju)
- U havarijskim režimima odstupanja mogu biti i do ± 2 Hz
- Frekvencije ispod 47,5 Hz opasne za generatore zbog mehaničkih vibracija
- Prema EN 50160 mjeri se srednja vrijednost frekvencije unutar 10 sek.
- Dozvoljena odstupanja prema EN 50160
 - za mreže koje rade sinkrono s interkonetiranim sustavom:
 $\pm 1\%$ (za 99,5% tjedna) , $+4\%$ / -6% (za preostalih 0,5% tjedna)
 - za mreže u otočnom radu:
 $\pm 2\%$ (za 99,5% tjedna) , $\pm 15\%$ (za preostalih 0,5% tjedna)