



## **Energetski odsek**

**Predmet: Praktikum iz elemenata EES-a**

**Vežba 2: Prenošenje viših harmonika kroz energetski transformator**

Ime i prezime: \_\_\_\_\_

br. indeksa: \_\_\_\_\_

Ime i prezime: \_\_\_\_\_

br. indeksa: \_\_\_\_\_

Ime i prezime: \_\_\_\_\_

br. indeksa: \_\_\_\_\_

### **1. Cilj vežbe**

U vežbi će biti analizirano prenošenje viših harmonika kroz energetske transformatore sprega Dyn i YNyn, kao i štetne posledice koje viši harmonici izazivaju. U vežbi će biti pokazan uticaj viših harmonika na povećanje gubitaka u transformatoru. Na osnovu izvršenih merenja biće određene vrednosti K-faktora, koji predstavlja meru uticaja viših harmonika u struji opterećenja na transformator, i D-faktora (derating factor), na osnovu koga se može proceniti potrebno smanjenje opterećenja standardnog energetskog transformatora u slučaju prisustva viših harmonika.

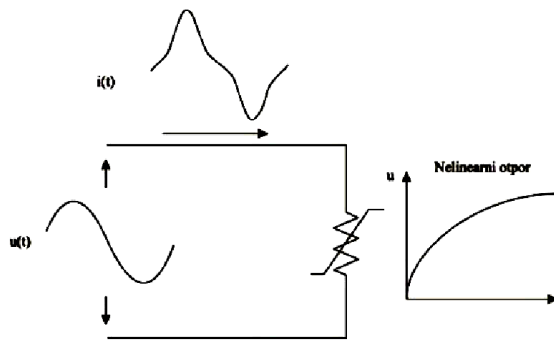
### **2. Teorijsko objašnjenje**

Povećano korišćenje nelinearnih opterećenja u elektrodistributivnoj mreži dovodi do harmonijske naponske i strujne distorzije (eng. Total harmonic distortion-THD) koja je u današnje vreme sve više u porastu. Posledice na elemente elektrodistributivnog sistema, a naročito na transformatore (kao najskuplje komponente u sistemu) postaju sve više izražene. Uticaji harmonijskog izobličenja u distributivnim mrežama ne moraju biti odmah vidljivi, ali dugoročno mogu imati ozbiljne posledice jer utiču na životni vek ugrađene opreme [1].

Harmonici struja stvaraju probleme u napojnoj mreži kao i u instalacijama potrošača koji ih uzrokuje. Posledice i rešenja mogu biti veoma različita. Među najznačajnijim problemima do kojih može dovesti postojanje harmonika su: pregrevanje nultog provodnika, pregrevanje i povećanje gubitaka kod transformatora i električnih mašina, pojava rezonancije u mreži, nekontrolisano delovanje zaštitnih i upravljačkih uređaja, uticaj na telekomunikacione veze itd. Neke od metoda za ublažavanje i eliminisanje harmonika su: smanjenje intenziteta harmonijskih struja, ugradnja filtera, promena rezonantne frekvencije sistema [2,3].

#### **2.1 Nelinearna opterećenja**

Struja nelinearnih potrošača nije linearno proporcionalna naponu napajanja. Ako se idealni sinusni napon dovede na nelinearni otpor, struja napajanja će odgovarati U - I karakteristici nelinearnog otpora, kao što je prikazano na Sl. 2.1. Može se videti da iako je talasni oblik napona sinusnog oblika, talasni oblik struje odstupa od sinusnog oblika [2,4].



Sl. 2.1. Izobličenje struje uzrokovano nelinearnim otporom

### 2.1.1 Izvori viših harmonika [2]

Pojava viših harmonika i njihovi efekti na distributivnu mrežu usloveli su grupisanje svih potrošača u tri velike grupe, prema tome kako deluju na izobličenje mrežnog napona:

1. Prvu grupu potrošača čine aparati koji se primenjuju u domaćinstvu ili slični uređaji masovne primene. To su uređaji male snage, ali postoji velika verovatnoća istovremenog priključivanja većeg broja takvih uređaja na distributivnu mrežu (televizori, video - rekorderi, kompjuteri, klima uređaji, besprekidna napajanja, štedljive sijalice itd).

Još veći izvor harmonika su potrošači u poslovnim kancelarijama i tercijarni sektor. U ovakvim prostorijama obično ima značajno više aparata sa energetsom elektronikom, i više se vremena koriste. Sem toga upotreba čisto termičkih potrošača je ovde retka, te su često opisani aparati jedini potrošači u instalacijama.

2. Druga grupa potrošača se nalazi u okviru industrijskih pogona ili je direktno vezana za prenosnu mrežu. Kod ovih potrošača potrebno je voditi računa da se ne izobliče suviše naponi i struje u distributivnoj mreži i da pojava viših harmonika napona u napojnom sistemu unutar pogona ne stvara probleme u radu instalisanih mašina i druge opreme.
3. Treću grupu potrošača čine energetske pretvarači velikih industrijskih postrojenja ili pretvarači koji se koriste u domenu prenosa električne energije (invertorskoispravljačke stanice prenosa jednosmernim naponom).

Kod industrijskih potrošača je dobro to što postoji veća mogućnost monitoringa jer su to veći potrošači i ima ih brojačno manje. Od njih se može zahtevati da ugrade filtre koji će smanjiti izobličenje napona. Za to su i oni sami često motivisani u svrhu podizanja kvaliteta električne energije koja im se isporučuje.[5]

### 2.1.2 Indeksi i veličine bitne za analizu viših harmonika

Svaka od veličina koja će biti prikazana u ovom podpoglavlju se može definisati i za struje i za napone.

Proizvoljan izobličen periodični signal struje se može predstaviti, kao suma jednosmerne komponente (konstante) i beskonačnog niza harmonika (prostoperiodičnih funkcija) čije se periode odnose kao celi brojevi, na sledeći način:

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1,2,\dots}^{h_{\max}} I_{(h)RMS} \cos(h2\pi ft + \beta_h) \quad , \quad (1)$$

gde su:  $I_0$  - jednosmerna komponenta struje,  $h$  - red harmonika,  $I_{(h)RMS}$  - efektivna vrednost h-tog harmonika struje,  $\beta_h$  - početna faza h-tog harmonika struje i  $f$  - osnovna frekvencija.

**Efektivna vrednost** definiše se kao:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad (2)$$

Ako signal sadrži više harmonike, efektivna vrednost se računa kao:

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{1RMS}^2 + I_{2RMS}^2 + \dots + I_{hRMS}^2} \quad (3)$$

Zagrevanje provodnika kroz koje protiče struja je određeno upravo efektivnom vrednošću struje.

**Vršni faktor** (*Crest factor* - CF) definiše se kao odnos vršne i efektivne vrednosti signala. Bitan je za određivanje dielektričnog stresa koji trpi materijal.

$$C_r = \frac{\hat{i}}{I_{RMS}} \quad (4)$$

**Harmonijski faktor** (*Harmonic Factor* - HF) - definiše se za svaki harmonik posebno kao odnos efektivne vrednosti tog harmonika i efektivne vrednosti osnovnog harmonika.

$$HF_h = \frac{U_h}{U_1}$$

**Totalno harmonijsko izobličenje** (*Total Harmonic Distortion* - THD) - predstavlja meru bliskosti stvarnog talasnog oblika signala i njegovog osnovnog harmonika. Računa se na sledeći način:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_{(h)}^2}}{I_1} \text{ ili } THD_I = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_1}. \quad (5)$$

### Harmonici u trofaznom sistemu

Osnovni harmonici struja u simetričnom trofaznom sistemu su međusobno pomereni za trećinu periode:

$$i_R(t) = i(t) \text{ , } i_S(t) = i(t - \frac{T}{3}) \text{ i } i_T(t) = i(t + \frac{T}{3}).$$

Pozitivan redosled faza u trofaznom sistemu je R, S, T; on se još naziva direktnim sistemom. Negativan redosled faza u trofaznom sistemu je R, T, S; on se još naziva inverznim sistemom. U nultom sistemu sve tri faze imaju isti fazni ugao.

Harmonici različitog reda su raspoređeni na sledeći način:

- ◇ Direktan sistem: 1, 4, 7, 10, 13, ..., 3h+1...,
- ◇ Inverzan sistem: 2, 5, 8, 11, 14, ..., 3h+2...,
- ◇ Nulti sistem: 3, 6, 9, 12, 15, ..., 3h ...,

gde je h red harmonika (h=0,1,2...)

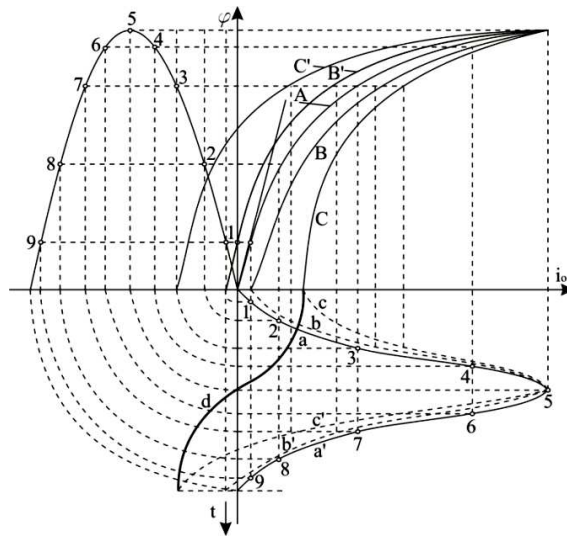
$$\begin{aligned} i_{R(h)}(t) &= \sqrt{2} I_{(h)} \cos(h2\pi ft + \beta_{(h)}) \\ i_{S(h)}(t) &= \sqrt{2} I_{(h)} \cos(h2\pi ft + \beta_{(h)} - h \frac{2\pi}{3}) \\ i_{T(h)}(t) &= \sqrt{2} I_{(h)} \cos(h2\pi ft + \beta_{(h)} + h \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.2 Transformator - izvor viših harmonika

### 2.2.1 Magnetske karakteristike limova [6]

Limovi se karakterišu gubicima energije i krivom magnećenja, tj. magnetskom indukcijom u funkciji magne-tnog polja ili magnetopubudne sile ili struje magnećenja. Gubici nastaju usled histerezisa i usled vihornih struja. Po-smatraće se prvo idealni lim – bez gubitaka energije. Odnos  $B=f(H)$  nije linearan, pa ni odnos  $\varphi=f(i)$  nije linearan. Line-arni odnosi bi važili isključivo u slučaju kada bi magnetsko kolo bilo sačinjeno od vazduha – tada se za kosinusni oblik napona dobija struja magnećenja i fluks koji su čiste sinu-soide (pri zanemarenoj aktivnoj otpornosti). Ako postoji gvo-žđe, za sinusoidalni fluks, struja magnećenja jako odstupa od sinusoidalnog oblika, i tim više što je jače zasićenje jezgra.

Na narednoj slici prikazano je konstruisanje krive magnećenja (ili idealnog praznog hoda) transformatora sa gvozdenim jezgrom. Sa A je označena kriva  $\varphi=f(i_0)$  bez histerezisa. Na osnovu nje dobija se kriva struje a.



Sl. 2.2 Formiranje talasnog oblika struje praznog hoda [6]

Prvi korak ka modelovanju realnih uslova je uzimanje u obzir samo histerezisa pri vrlo sporim promenama (mala frekvencija). Tada kriva fluksa postaje dvoznačna – ima uzla-znu i silaznu krivu B i B', respektivno. Polazeći od ove krive, može se naći kriva struje b. Ova struja je, za razliku od struje a, nesimetrična. Asimetrija se javlja zbog toga što se pri porastu fluksa ide donjom, a pri smanjenju fluksa gornjom granom. Kao posledica toga, u struji b postoji aktivna ko-mponenta struje koja pokriva gubitke aktivne snage u jezgru (u ovom slučaju samo histerezisne gubitke). Ti gubici su srazmerni površini koju obuhvata histerezisna petlja BB'.

Ako se u obzir uzmu i gubici usled vihornih struja, histerezisna petlja postaće znatno šira - CC'. Ta petlja važi samo za jednu frekvenciju, jer gubici usled vihornih struja zavise od frekvencije. Na osnovu ove petlje, dobija se struja c, koja ima još izraženiju nesimetriju od struje b, jer su gubici sada veći, a time i aktivna komponenta struje. Kriva d predstavlja ukupnu aktivnu komponentu struje. Može se primetiti da je ona približno kosinusnog oblika i da je u fazi sa naponom.

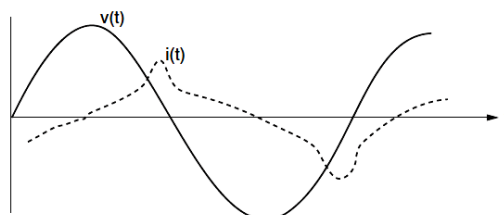
Analizom vremenskih oblika struje može se sledeće zaključiti:

1. da struja sadrži više harmonike, od kojih je najznačajniji treći,
2. maksimalna vrednost struja a, b i c je ista, jer njoj ne doprinosi ni aktivna komponenta struje, ni histerezis
3. viši harmonici malo utiču na efektivnu vrednost struje magnetećenja.

### 2.2.2 Određivanje struje praznog hoda [2]

Struja praznog hoda i njene komponente mogu se izmeriti na već gotovom transformatoru. Potrebno je, međutim, ove struje računati već u fazi projektovanja, kako bi gotov transformator zadovoljio zadate uslove u pogledu gubitaka u gvožđu – što je vezano za vrednost aktivne komponente praznog hoda, a takođe i u pogledu reaktivne snage koja kviri faktor snage mreže – što je vezano za reaktivnu komponentu struje praznog hoda.

Dakle, pošto karakteristika magnetnog kola nije prava linija, induktivnost  $L_\mu$  nije konstantna. S obzirom na to struja nema sinusoidalni oblik i njena vrednost nije srazmerna sa naponom. Takođe, u gvožđu postoje gubici energije koje mora pokriti mreža na koju je priključen transformator. Kao posledica toga, postoji aktivna komponenta struje praznog hoda, pa ona zaostaje manje od  $90^\circ$  za fazom napona, [6,7]. Ove pojave su ilustrovane na Sl. 2.3.



Sl. 2.3. Talasni oblici napona i struje[7]

### 2.3. Uticaj harmonika na transformatore [2]

U većini savremenih distributivnih mreža iznos viših harmonika struja je značajan u odnosu na osnovni harmonik. Viši harmonici struje dovode do povećanja gubitaka u gvožđu i namotajima distributivnih transformatora zbog povećanja nivoa rasutog fluksa, kao i do povećanja buke koju emituje transformator, zagrevanja provodnika, kućišta, držača, steznih zavrtanja itd. Sve to smanjuje efikasnost transformatora i ubrzava starenje izolacije usled dodatnog zagrevanja. Ovo dalje vodi do smanjenja vremenskog razmaka za zamenu transformatora koji se određuje na osnovu standarda IEC 354 – Uputstvo za opterećivanje uljnih energetske transformatora.

Prema IEC 60076-7 posledice korišćenja nelinearnih opterećenja su sledeće:

1. temperatura namotaja, stezaljki, spojnih žica, izolacije i ulja raste i može dostići neprihvatljivi nivo,
2. rasuta gustina fluksa van aktivnih delova se povećava, izaziva dodatna zagrevanja usled vrtložnih struja u metalnim delovima koje obuhvata fluks,
3. kombinacija glavnog fluksa i uvećanog rasipanja i nulte komponente fluksa smanjuje efikasnost jezgra,
4. sa promenom temperature, menja se i sadržaj vlage i gasova u izolaciji i ulju,
5. uvodni izolatori, priključne veze kablova i strujni transformatori biće izloženi većem opterećenju, koje prevazilazi njihove projektovane i radne granične vrednosti.

#### 2.3.1 Povećanje gubitaka transformatora usled nelinearnog opterećenja [1, 2]

Uticaji viših harmonika struje na gubitke transformatora su sledeći:

1. Uticaj viših harmonika na dodatne gubitke u namotajima transformatora ( $P_{Cu}$ ) - Efektivna vrednost struje opterećenja se povećava zbog sadržaja viših harmonika, tako da su sada gubici u bakru  $P_{Cu}$  dati izrazom:

$$P_{Cu} = R \cdot I_{eff}^2 = R \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} I_{h,eff}^2 \quad (7)$$

2. Uticaj harmonika struje na gubitke usled vrtložnih struja u namotajima  $P_{EC}$  - Ove struje se javljaju u provodnicima transformatora usled curenja magnetnog fluksa. Ovi gubici su proporcionalni kvadratu struje opterećenja i kvadratu frekvencije. Upravo ova karakteristika može da izazove prevelike gubitke u namotajima i samim tim neprihvatljiv porast temperature namotaja transformatora. Pri proticanju struje koja, pored osnovnog ( $h=1$ ), sadrži i više harmonike reda  $h=2,3,\dots,h_{max}$ , gubici  $P_{EC}$  su dati izrazom:

$$P_{EC} = P_{EC-In} \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left( \frac{I_h}{I_{In}} \right)^2 \cdot h^2 \quad (8.a)$$

gde su  $P_{EC-In}$  – gubici usled vrtložnih struja pri nominalnoj struji ( $I_{In}$ ) osnovne frekvencije ( $h=1$ ).

Faktor harmonijskih gubitaka  $F_{HL}$  u namotajima usled vrtložnih struja se računa sa:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (8.b)$$

Stoga, nominalni gubici u namotajima transformatora usled vrtložnih struja se množe sa  $F_{HL}$  da bi se odredili dodatni gubici usled nelinearnih opterećenja (prema ANSI/IEEE preporuci C57.11).

3. Uticaj harmonika struje na ostale gubitke usled rasipanja  $P_{SL}$  - Ostali gubici u transformatoru se pojavljuju zbog fluksa rasipanja koji predstavljaju gubitke u konstrukcijskim delovima transformatora kao što su kotao, priključne stezaljke, metalni držači, itd. Ovi gubici će se povećati proporcionalno kvadratu struje opterećenja. Studije proizvođača i drugih istraživača pokazuju da gubici usled vrtložnih struja na glavnim mestima spajanja i strukturalnim delovima

rastu sa harmonijskim eksponencijalnim faktorom od 0,8 ili manje. Ostali gubici usled rasipanja mogu se izračunati na sledeći način:

$$P_{SL} = P_{SL-1n} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_{1n}} \right)^2 \cdot h^{0.8} \quad (9.a)$$

gde su  $P_{SL-1n}$  – gubici u sudu i konstrukcijskim delovima zbog polja rasipanja pri nominalnoj vrednosti struje ( $I_{1n}$ ) osnovne frekvencije ( $h=1$ ).

Faktor harmonijskih gubitaka  $F_{HL-SL}$  u sudu i konstrukcijskim delovima zbog fluksa rasipanja se računa prema:

$$F_{HL-SL} = \frac{P_{SL}}{P_{SL-1n}} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (9.b)$$

Stoga, nominalni gubici u sudu i konstrukcijskim delovima zbog fluksa rasipanja se množe sa  $F_{HL-ST}$  da bi se dobili dodatni gubici usled nelinearnih opterećenja (prema ANSI/IEEE preporuci C57.11).

#### 4. DC komponente struje opterećenja

Harmonične struje opterećenja su praćene DC komponentom. DC komponenta struje opterećenja će neznatno povećati gubitke u jezgri transformatora, ali će znatno povećati struju magnećenja i brujanje transformatora.[4]

Gubici povećavaju temperaturu osnovnih delova, a za uljne transformatore to je temperatura ulja. Dakle, struje viših harmonika uzrokuju dodatna dielektrička, termička i mehanička naprezanja u elektroenergetskim mrežama, te dovode do pojačanog zagrevanja transformatora i zasićenja jezgra. Dodatni termički gubici mogu uticati i na smanjenje životnog veka i na smanjenu operativnost transformatora značajno ispod nazivne snage.

### 2.3.2 K faktor transformatora

K–faktor je mera uticaja viših harmonijskih članova u struji opterećenja na transformator, a definisan je prema ANSI/IEEE preporuci C57.110-1986. K–faktor definiše kako transformator podnosi dodatno zagrevanje (povećane gubitke) izazvano višim harmonicima u struji opterećenja. Ovaj faktor je definisan izrazom:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2}, \quad (10)$$

gde je  $h$  red harmonika, a  $I_h/I_1$  odgovarajući pojedinačni faktor koji pokazuje udeo strije h-tog harmonika u odnosu na osnovni harmonik. Izraz (10) se može napisati i kao:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2}{1 + THD_I^2}. \quad (11)$$

Jedna od metoda koja omogućuje rad transformatora u prisustvu viših harmonika je projektovanje transformatora sa K–faktorom. U Tab. 2.1 su prikazani komercijalno raspoloživi K–transformatori i tipična opterećenja, s tim da svi standardni transformatori spadaju u grupu K–1 [8].

Transformator s većim K–faktorom može podneti veće nelinearno opterećenje, tj. veće opterećenje snagama viših harmonika, a da mu se zbog toga ne smanji operativnost. Jasno je da su takvi transformatori zbog svoje konstrukcije skuplji, ali s obzirom da su građeni za specijalne uslove rada, imaju duži životni vek od običnog distributivnog transformatora, ukoliko ih opteretimo istim strujama viših harmonika. Zbog toga se ovi transformatori ugrađuju u nove mreže ili kao zamena starim transformatorima tamo gde je to potrebno [8].

Transformatori sa K-faktorom imaju specifičnosti u konstrukciji, koje omogućavaju smanjenje dodatnog zagrevanja usled viših harmonika, kao što su: magnetski štitovi, magnetski šantovi, povećanje klase izolacije, pojačanje neutralnog provodnika, upotreba elektrostatičkih uzemljenih štitova itd. Transformatori projektovani prema određenom K – faktoru su približno dva puta skuplji i teži za oko 115 % od klasičnih transformatora. I, pored toga, preporučuje se njihovo korišćenje kako bi se izbegle nepredviđene vruće tačke koje bi se javile kod klasičnih transformatora pri nesinusoidalnom opterećenju [2,9-11].

Tab. 2.1 Raspoloživi K-transformatori

<b>K – faktor</b>	<b>Tipovi opterećenja</b>
<b>K–1</b>	Inkandescentna rasveta, termička opterećenja (grejna tela), motori, elektromagnetni pretvarači.
<b>K–4</b>	Rasveta na principu električnog pražnjenja, indukciona grejna oprema, aparati za električno zavarivanje, PLC uređaji, UPS sistemi koji imaju ugrađen filter za više harmonike.
<b>K–13</b>	Telekomunikaciona oprema, UPS sistemi koji nemaju ugrađen filter za više harmonike, Elektronski uređaji sa dosta upravljačkih kola.
<b>K–20</b>	Računari i računarska oprema, motorni pogoni sa pretvaračima za promenu brzine obrtanja.
<b>K–30</b>	Priključni uređaji sa dosta energetske pretvarača na bazi energetske elektronike u industriji, medicini, obrazovnim laboratorijama, kao i uređaji u komercijalnom kancelarijskom prostoru.
<b>K–40</b>	Ostala opterećenja identifikovana kao izvori viših harmonika (naročito višeg reda).

Ukoliko K-faktor dobijen pomoću izraza (10) ili (11) pređe vrednost 4, neophodno je koristiti K-transformator ili smanjiti opterećenje standardnog transformatora.

D – faktor (the derating factor) ili faktor smanjenja opterećenja za standardni transformator prema ANSI/IEEE preporuci C57.110-1986 definisan je izrazom:

$$D = \frac{1.15}{1 + 0.15 \cdot K} \quad (12)$$

Na primer, ukoliko je za neki transformator pomoću izraza (11) dobijeno da K-faktor iznosi 4.171. Tada se pomoću izraza (12) može dobiti da faktor smanjenja opterećenja D iznosi: D=0.7074. U tom slučaju moguće su dve opcije:

- upotreba standardnog transformatora, pri čemu treba obezbediti da njegovo opterećenje ne prelazi 70.74%, ili
- upotreba K-transformatora sa K=4, pri čemu taj transformator može raditi pod punim opterećenjem.[12]

## 2.4 Sprege energetskih transformatora [2]

Kod trofaznih transformatora moguća su, u osnovi, dva tehnička rešenja:

1. grupa od tri jednofazna transformatora, sa zasebnim magnetskim kolima
2. jedan trofazni transformator sa zajedničkim magnetskim kolom.

### 2.4.1. Vrste sprega [2]

Vrste sprega su:

**Trougao** (oznaka D za VN, odnosno d za NN)

Ova sprega omogućava:

- da struje u faznim provodnicima namotaja budu  $\sqrt{3}$  puta manje od struje u linijama. Ovo je bitno kod transformatora velikih snaga, naročito na nižim naponima.
- suzbijanje nulte komponente struje i viših harmonika čiji je red deljiv sa tri, ako se jave na strani uzemljene zvezde. Ako se nulta struja i harmonici deljivi sa tri jave na strani trougla ne mogu se u njemu zatvoriti te se ne prenose na drugu stranu transformatora. Elektromotorne sile trećeg harmonika u različitim fazama su međusobno u fazi. Zato ne mogu u namotaju trougla generisati struje.

Budući da su međufazni i fazni naponi jednaki, ova sprega, u odnosu na spregu zvezda, zahteva veći broj navojaka, manjeg preseka (radi 3 puta manje struje) uz veće učešće izolacije. Ovo ima za posledicu veću količinu bakra kod visokonaponskih transformatora.

**Zvezda** (oznaka Y za VN, odnosno y za NN)

Ova sprega omogućava:

- uzemljenje neutralne tačke, što ograničava prenapone i smanjuje izolaciju koja je skupa na visokom naponu,
- izvlačenje neutralnog provodnika u niskonaponskim mrežama, što omogućava priključak jednofaznih prijemnika na trofaznu mrežu,
- fazni napon je tri puta manji od međufaznog (priključenog) napona.

**Slomljena zvezda** (oznaka z )

Ova sprega omogućava:

- uzemljenje zvezdišta i izvlačenje neutralnog provodnika kao i kod spregu zvezda
- sprega Z je skuplja jer zahteva veći broj navojaka i ko-mplikovaniji namotaj ali zato ima najmanju nultu impedansu od svih sprega. Zato je Z sprega pogodna za asimetrična opterećenja, kada se javlja nulta komponenta struje.

Namotaj pojedine faze sačinjavaju dva redno povezana polunamotaja koji nisu na istom stubu. Ova sprega se isključivo primenjuje za NN namotaje. Razlog tome je to što je pri njenoj realizaciji, za dobijanje istog faznog napona kao i pri sprezi Y, potrebno  $\sqrt{3}/2$  puta više navojaka, što zahteva oko 15.47% više bakra u odnosu na spregu Y. S obzirom na visoku cenu bakra ova osobina se javlja kao veliki nedostatak spregu Z. Međutim, njene izuzetno dobre osobine pri asimetričnim opterećenjima, čine je često korišćenom kod namota niskog napona trofaznih transformatora.[6,13]

Da bi se izbeglo nepotrebno šarenilo u praksi se ne koriste sve moguće spregu trofaznih energetskih transformatora. Standardne spregu su date u sledećoj tabeli:

Tab 2.2. Standardne spregu transformatora

Grupa sa sprežnim brojem	Standardna sprega
k = 0	Dd0, Yy0, Dz0
k = 6	Dd6, Yy6, Dz6 (retko se koriste)
k = 5	Dy5, Yd5, (Dz5 – retko se koristi)
k = 11	Dy11, Yd11, Yz11 (retko se koriste)

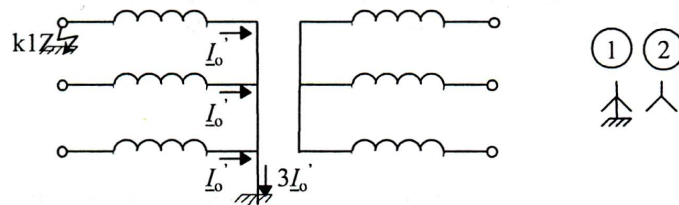
Izvor: Milenko Đurić, „Visokonaponska postrojenja“

#### 2.4.2 Uticaj spregu transformatora i načina uzemljenja zvezdišta na nulte šeme transformatora [14]

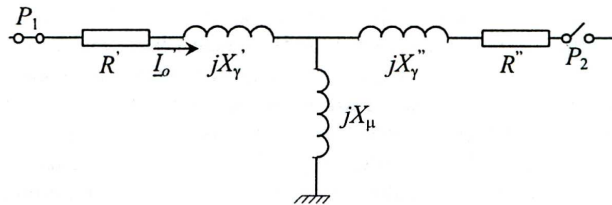
Kod proučavanja nultih šema važno je ukazati da su nulte struje naizmenične prirode i da su jednovremene u sve tri faze. Na identičan način kako se ponašaju nulte struje, ponašaju se i struje trećeg harmonika (kao i svih ostalih visih harmonika čiji je red multipl broja 3).

Najpre će biti obrađena sprega *uzemljena zvezda - izolovana zvezda*. Odgovarajuća trofazna šema prikazana je na Sl. 2.4, a njoj korespondentna nulta ekvivalentna (monofazna) šema energetskog transformatora je nacrtana na Sl. 2.5.





Sl. 2.4. Trofazna šema sprege uzemljena zvezda - izolovana zvezda [14]

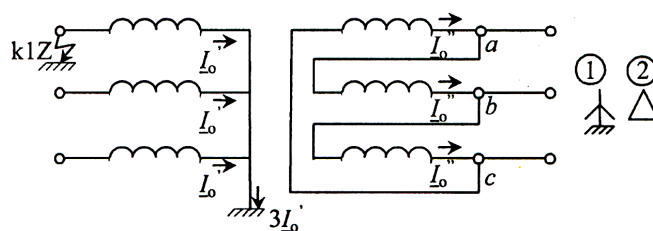


Sl. 2.5. Ekvivalentna nulta šema sprege uzemljena zvezda - izolovana zvezda [14]

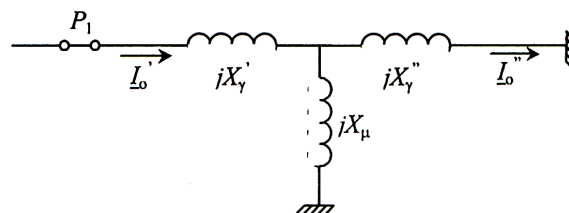
U cilju sagledavanja efekata kvara sa razlicitih strana transformatora najpre se pretpostavlja nesimetričan otočni kvar sa zemljom (npr.  $k_{1Z}$ ), na strani uzemljene zvezde (primarna strana transformatora sa strujom  $I_0'$ ), kako bi se imali uslovi postojanja nultih struja. Mesto nesimetrije kvara je generator nultih struja koje formiraju nulte flukseve u transformatoru. Ovi nulti fluksevi indukuju nulte ems u sekundaru, ali se ne javljaju nulte struje, jer je nulta impedansa beskonačno velika na strani sekundara (izolovano sekundarno zvezdište). Kada je ista vrsta kvara ( $k_{1Z}$ ) na strani neuzemljene zvezde tada se, iz ovog razloga, ne mogu zatvoriti nulte komponente struja.

Efekat beskonačno velike nulte impedanse u sekundarnom kolu je na Sl. 2.5 simbolično je predstavljen otvorenim prekidačem P2. S druge strane, prekidač P1 u primarnom kolu je zatvoren, čime se ukazuje da nulte struje teku kroz primarne namotaje. Naravno, na transformator kao element sistema vezani su i sa leve i sa desne strane ostali elementi sistema. Jasno se vidi da ako je  $k_{1Z}$  sa desne strane, da nulte struje tada ne mogu da teku jer je prekidač P2 otvoren.

Kao sledeći karakterističan primer biće obrađena veoma česta sprega u EES-u, *uzemljena zvezda-trougao* (YNd sprega). Ova sprega, sa trouglom na strani generatora, je tipična u elektranama, a sa trouglom na strani potrošačkog područja je tipična u distributivnim mrežama. Odgovarajuća trofazna šema prikazana je na Sl. 2.6, a monofazna ekvivalentna šema za kvar na strani uzemljene zvezde (npr.  $k_{1Z}$ ), prikazana je na Sl. 2.7.



Sl. 2.6. Trofazna šema sprege uzemljena zvezda – trougao [14]



Sl. 2.7. Ekvivalentna nulta šema sprege uzemljena zvezda – trougao [14]

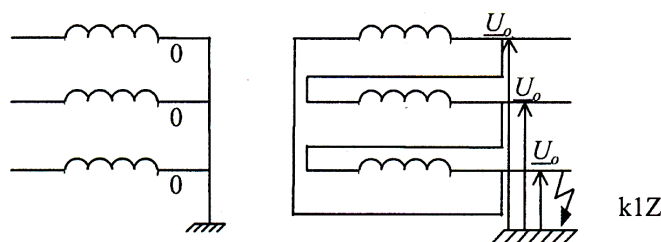
U slučaju nesimetričnog otočnog kvara sa zemljom koji se dešava na strani uzemljene zvezde, nulte struje teku kroz namotaje zvezde i kao posledica te činjenice nulti fluksevi indukuju sekundarne nulte ems,  $\underline{E}_0''$ . Ovo su tri jednovremene ems i kao posledica njihovog postojanja u svakoj od faza teku

identične nulte struje  $\underline{I}_0''$ . Ako se proveriti I Kirchoff-ov zakon za tačku b (koja predstavlja izvod faze b), tada se jasno konstatuje da nultih struja nema van trougla. Ovo se može pokazati i na sledeći način, ako za konturu unutar trougla važi:  $3 \cdot \underline{E}_0'' - 3 \cdot jX_\gamma'' \underline{I}_0'' = 0$ , odakle sledi  $\underline{I}_0'' = \frac{\underline{E}_0''}{jX_\gamma''}$ .

Napon  $\underline{U}_{ab}$  je  $\underline{U}_{ab} = jX_\gamma'' \underline{I}_0'' - \underline{E}_0'' = jX_\gamma'' \frac{\underline{E}_0''}{jX_\gamma''} - \underline{E}_0'' = 0$ .

Dakle, nulte struje teku u trouglu, ali ne izlaze van njega, tako da se trougao ponaša zaprečno za nulte struje. U ekvivalentnoj (monofaznoj) šemi je to označeno sa nultim potencijalom, odnosno završetkom nultog kola na strani trougla.

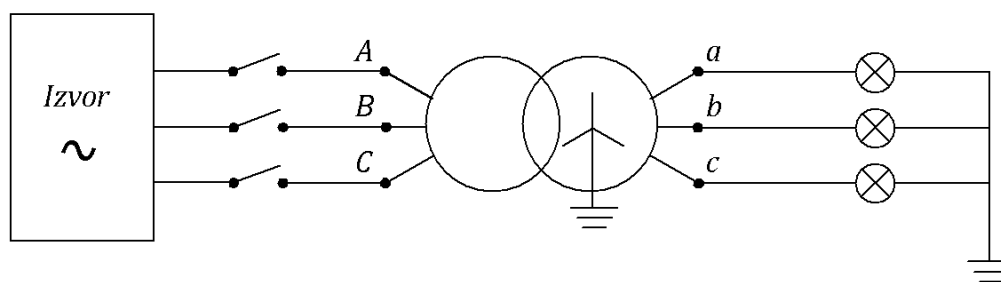
U situacijama kada je nesimetrija sa strane trougla ima se šema na Sl. 2.8. Razlika potencijala za nulti komponentni sistem na namotajima trougla je  $(\underline{U}_0 - \underline{U}_0)$ , pa se zaključuje da nema nultih struja u trouglu.



Sl. 2.8. Trofazna šema sprege uzemljena zvezda - trougao za slučaj kvara na strani trougla [14]

### 3. Zadatak vežbe

U vežbi će biti analizirano prenošenje viših harmonika kroz energetski transformator. Fizički model trofaznog transformatora, koji će biti korišćen, napravljen je od tri monofazna transformatora, osnovnih karakteristika za jedan transformator:  $S_n=300\text{VA}$ , primar:  $U_n=380\text{V}$ ,  $I_n=0.9\text{A}$ , sekundar:  $U_n=220\text{V}$ ,  $I_n=1.4\text{A}$ . Kao opterećenje koristiće se štedljive sijalice. Na Sl. 3.1. je prikazana šema veza koja će biti korišćena.



Slika 3.1. Šema veza

#### A. Povezati transformator tako da bude sprege Dyn

A.1. Za simetrično opterećen transformator sprege **Dyn** uočiti nivoe dominantnih viših harmonika u strujama izmerenim na priključcima primara i sekundara transformatora i rezultate uneti u Tab.3.1. Zatim izvršiti harmonijsku analizu struje u trouglu primarnog namotaja i rezultate uneti u Tab.3.2.

Tab 3.1.

<i>Primar TR-a sprega - D</i>		<i>Sekundar TR-a sprega - yn</i>	
red harmonika	nivo harmonika	red harmonika	nivo harmonika

Tab 3.2.

<i>Nivo dominantnih viših harmonika unutar namotaja spregnutog u D</i>	
red harmonika	nivo harmonika

A.2. Na osnovu merenja dobijenih u prethodnom zadatku uporediti nivoe trećeg harmonika (kao i ostalih viših harmonika čiji je red multipl broja 3) u strujama izmerenim na priključcima primara i sekundara transformatora.

A.3. Uočiti nivoe dominantnih viših harmonika u strujama izmerenim na priključcima primara i sekundara transformatora sprega **Dyn** za slučajeve (a) i (b), i rezultate uneti u odgovarajuće tabele.

a) uključene dve štedljive sijalice (u fazama a i b);

Tab 3.3.

<i>Primar TR-a sprega - D</i>					
<i>priključak A</i>		<i>priključak B</i>		<i>priključak C</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.
<i>Sekundar TR-a sprega - yn</i>					
<i>priključak a</i>		<i>priključak b</i>		<i>priključak c</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.

b) uključena jedna štedljiva sijalica (u fazi a).

Tab 3.4.

<b>Primar TR-a sprega - D</b>					
<i>priključak A</i>		<i>priključak B</i>		<i>priključak C</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.
<b>Sekundar TR-a sprega - yn</b>					
<i>priključak a</i>		<i>priključak b</i>		<i>priključak c</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.

## B. Povezati transformator tako da bude sprege YNyn

B.1. Za simetrično opterećen transformator sprege *YNyn* uočiti nivoe dominantnih viših harmonika u strujama izmerenim na priključcima primara i sekundara transformatora i rezultate uneti u Tab.3.5. Zatim izvršiti harmonijsku analizu struje u neutralnom provodniku potrošača i rezultate uneti u Tab.3.6.

Tab 3.5.

<b>Primar TR-a sprega - YN</b>		<b>Sekundar TR-a sprega - yn</b>	
red harmonika	nivo harmonika	red harmonika	nivo harmonika

Tab 3.6.

<b>Nivo dominantnih viših harmonika u neutralnom provodniku potrošača</b>	
red harmonika	nivo harmonika

B.2. Na osnovu merenja dobijenih u prethodnom zadatku uporediti nivoe trećeg harmonika (kao i ostalih viših harmonika čiji je red multipl broja 3) u strujama izmerenim na priključcima primara i sekundara transformatora.

B.3. Uočiti nivoe dominantnih viših harmonika u strujama izmerenim na priključcima primara i sekundara transformatora sprege **YNyn** za slučajeve (a) i (b), i rezultate uneti u odgovarajuće tabele.  
a) uključene dve štedljive sijalice (u fazama a i b);

Tab 3.7.

<b>Primar TR-a sprega - YN</b>					
<i>priključak A</i>		<i>priključak B</i>		<i>priključak C</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.
<b>Sekundar TR-a sprega - yn</b>					
<i>priključak a</i>		<i>priključak b</i>		<i>priključak c</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.

b) uključena jedna štedljiva sijalica (u fazi a).

Tab 3.8.

<b>Primar TR-a sprega - YN</b>					
<i>priključak A</i>		<i>priključak B</i>		<i>priključak C</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.
<b>Sekundar TR-a sprega - yn</b>					
<i>priključak a</i>		<i>priključak b</i>		<i>priključak c</i>	
red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.	red harm.	nivo harm.

**C. Na osnovu merenja u tački A.1. izračunati:**

C.1. Gubitke u namotajima transformatora  $P_{cu}$ .

C.2. Faktor harmonijskih gubitaka  $F_{HL}$  u namotajima usled vrtložnih struja.

C.3. Faktor harmonijskih gubitaka  $F_{HL-SL}$  u konstrukcijskim delovima zbog fluksa rasipanja.

**D. Na osnovu merenja u tački B.1. izračunati:**

D.1. K - faktor .

D.2. D- faktor.

#### 4. Literatura

- [1] D. Cvijić i P. Matić, „Analiza uticaja nelinearnih opterećenja na trofazne distributivne transformatore“, XII međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2013, R. ENS - 1 – 8
- [2] Dunja Grujić, Željko Đurišić, „Prenošenje viših harmonika kroz energetske transformatore“, Naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost, ENEF 2013, Banja Luka, Novembar 2013. godine.
- [3] Dž. Sinanović, A. Jahić, A. Botalić, „Analiza viših harmonika opterećenja PC-a sprega transformatora DYg“, List Saveza energetičara „Energija/Ekonomija/ Ekologija“, Broj 1 / Godina XII / Mart 2010, „Akademska izdanja“, Beograd, 2010.
- [4] L. Wagmann, S. Žutobradić, „Stohastička analiza harmonika na gradskim ts 10(20)/0,4 kV“, 1. savetovanje HO CIRED, Šibenik, 18 - 21. maj 2008, R. SO2 – 17.
- [5] Ž. Janda, „Pregled standarda i preporuka za kontrolu viših harmonika u električnim mrežama“, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, 2004.
- [6] Đ. Kalić i R. Radosavljević, „Transformatori“, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2001.
- [7] A. Cusco and M. Thompson, „Power Quality in Electrical Systems“, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007.
- [8] O. E. Gouda, G. M. Amer, W. A. A. Salem, “ A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation,” ETASR -Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 1, No. 5, 2011, 114-120
- [9] C. Sankaran, „Power Quality“, CRC Press LLC, Florida, 2002.
- [10] R. Berglund, „Frequency Dependence of Transformer Losses“, Master of Science Thesis in the Programme Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Goteborg, Sweden, December 2009.
- [11] S. Hutter, „Praćenje opterećenja distribucijskih transformatora“, 2.(8.) savetovanje HO CIRED, Umag, 16. – 19. svibnja 2010., R. SO1 – 21.
- [12] G.J.Wakileh, “Power Systems Harmonics – Fundamentals, Analysis and Filter Design”, Berlin , New York : Springer, 2001.
- [13] M. Đurić, „Visokonaponska postrojenja“, Beopres štampa, Beograd, 2009.
- [14] N. Rajaković, „Analiza elektroenergetskih sistema I“, Elektrotehnički fakultet Akademska misao, Beograd, 2002.