

MODELI TRANSFORMATORA I ASINHRONIH MAŠINA UZ UVAŽAVANJE VIŠIH HARMONIKA

MODELING OF TRANSFORMERS AND INDUCTION MACHINES WITH REGARD OF HIGHER HARMONICS

Marko Stojanović, Marko Vekić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

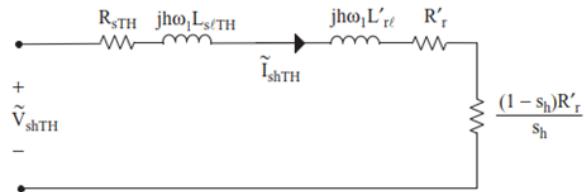
Oblast – ENERGETIKA

**Kratak sadržaj** – Ovaj rad bavi se modelovanjem odziva asinhronih mašina i transformatora u uslovima izobličenog mrežnog napona. Razmatrane su veličine kao što su gubici i električni moment.

**Ključne reči:** transformatori, asinhroni motori, viši harmonici

**Abstract** – This paper deals with the operation of Induction motors and transformers under distorted grid conditions.

**Keywords:** Induction motor, transformer, higher harmonics.



Slika 2.1 Tevenenovo ekvivalentno električno kolo asinhronne mašine za h-ti harmonik

$$\tilde{I}_{shTH} = \frac{\tilde{V}_{shTH}}{\left(R_{shTH} + \frac{R'_r}{s_h}\right) + jh\omega_1(L_{s1TH} + L'_{rl})} \quad \#(2.1)$$

$$T_{eh} = \frac{1}{w_{sh}} \frac{q_1 V_{shTH}^2 \frac{R'_r}{s_h}}{\left(R_{sTH} + \frac{R'_r}{s_h}\right)^2 + (h\omega_1)^2 (L_{s1TH} + L'_{rl})^2} \quad \#(2.2)$$

slično, za obrtni moment usled osnovnog harmonika dobija se:

$$T_{e1} = \frac{1}{w_{s1}} \frac{q_1 V_{s1TH}^2 \frac{R'_r}{s_1}}{\left(R_{sTH} + \frac{R'_r}{s_1}\right)^2 + (\omega_1)^2 (L_{s1TH} + L'_{rl})^2} \quad \#(2.3)$$

Klizanje asinhronne mašine pri prvom, kao i pri višim harmonicima, dato je sledećim relacijama:

$$s_1 = \frac{w_{s1} - w_m}{w_{s1}} \quad \#(2.4)$$

$$s_h = \frac{hw_{s1} - w_m}{hw_{s1}} \quad \#(2.5)$$

gde  $w_{s1} = \frac{w_1}{p/2}$  predstavlja mehaničku sinhronu ugaonu brzinu osnovnog harmonika, a  $w_m$  je mehanička ugaona brzina rotora.

Da bismo usvojili smer rotacije harmonijskih magnetopobudnih sila, u nastavku pretpostavljamo da prvi rotira u smeru kazaljke na satu (negativan matematički smer), peti obrnuto od smeta kazaljke na satu (pozitivan matematički smer), i sedmi, kao i prvi, u negativnom smeru.

1. UVOD - HARMONICI I KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

Nelinearni potrošači, odnosno transformatori, rotirajuće obrtne električne mašine, FACTS uređaji, i komponente energetske elektronike su neki od uzroka pojave nesinusnih talasnih oblika struje i napona, što uzrokuje loš kvalitet električne energije.

Glavne posledice viših harmonika su neispravan rad upravljačkih uređaja, telefonske smetnje, dodatni gubici na vodovima (pri osnovnom i višim harmonicima), smanjen životni vek i uvećani gubici uređaja (npr. transformatori, obrtne mašine, i kondenzatorske baterije), i neispravan rad korisničkih uređaja.

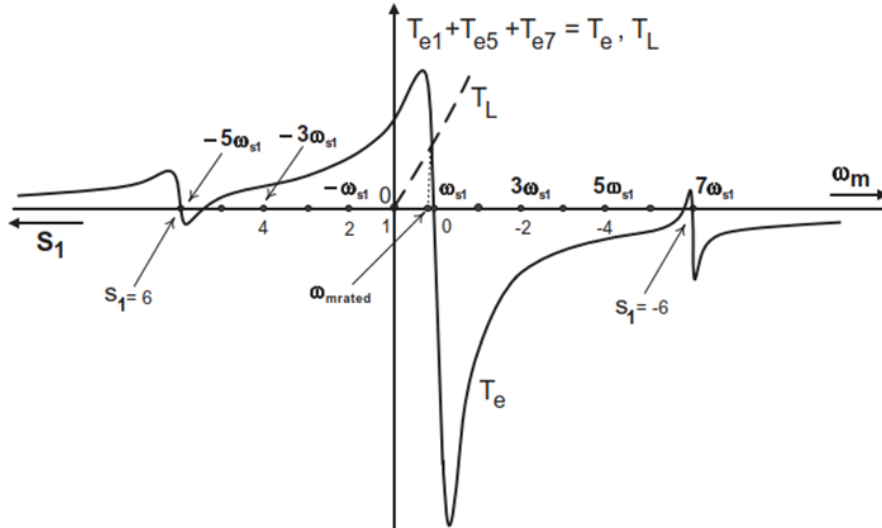
Loš kvalitet električne energije ima mnoge štetne posledice na uređaje sistema i krajnje potrošače. Ono što čini ovu pojavu dodatno lošom je to što njeni efekti ostaju neopaženi sve dok ne dođe do kvara. Postoje mnogi standardi i srodna dokumenta koja se bave problemima kvaliteta električne energije. Lista dostupnih dokumenata o problemima kvaliteta omogućava lakšu potragu za potrebnim informacijama.

2. MODEL ASINHRONE MAŠINE U SLUČAJU IZOBLIČENJA NAPONA NAPAJANJA

Za struju i obrtni moment h-tog harmonika, na osnovu aproksimacija i Tevenenove predstave (slika 2.1), dobija se:

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Vekić, vanr. prof.



Slika 2.2 Obrtni moment asinhronne mašine za osnovni, peti i sedmi harmonik u funkciji ugaone brzine i klizanja osnovnog harmonika  $S_1$

Superpozicija osnovnog ( $h = 1$ ), petog ( $h = 5$ ), i sedmog harmonika ( $h = 7$ ) obrtnog momenta  $T_e = T_{e1} + T_{e5} + T_{e7}$  prikazana je na slici 2.2. U tački  $\omega_m = \omega_{mrated}$  ukupni električni obrtni moment  $T_e$  je jednak obrtnom momentu opterećenja  $T_L$ , odnosno  $T_{e1} + T_{e5} + T_{e7} = T_L$ , gde  $T_{e1}$  i  $T_{e7}$  predstavljaju motorske obrtne momente, a  $T_{e5}$  kočioni obrtni moment.

### 3. SMANJIVANJE SNAGE TRANSFORMATORA USLED POJAVE VIŠIH HARMONIKA

Poznato je da mora doći do smanjenja snage transformatora kada se vrši napajanje nelinearnih opterećenja. Jedna od metoda koja omogućava opterećenje višim harmonicima je projektovanje transformatora s tzv. K-sačiniocem (faktorom), koji predstavlja meru uticaja viših harmonika u struji opterećenja na transformator.

Gubici opterećenja transformatora u uslovima viših harmonika su:

$$P_{LL} = \sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 + \left( \sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 h^2 \right) P_{EC-R} \quad (3.1)$$

Prvi i drugi sabirak sa desne strane iz prethodne jednačine predstavljaju  $I^2 R$ , i gubitke usled vrtložnih struja, redom. Ukoliko usvojimo da je  $P_{LL} = P_{LL-R}$  važi:

$$1 + P_{EC-R} = \sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 + \left( \sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 h^2 \right) P_{EC-R} \quad (3.2)$$

ukoliko uvedemo K-sačinilac kao:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 h^2}{I_1^2} \quad (3.3)$$

onda važi:

$$1 + P_{EC-R} = \sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 + K \left( \frac{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2}{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2} \right) P_{EC-R} \quad (3.4)$$

Rešavajući po:  $\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2$ ,

$$\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 = \frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \frac{I_R^2}{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2} (P_{EC-R})} \quad (3.5)$$

Dakle, kvadratni koren maksimalne vrednosti struje opterećenja koju transformator može da isporuči je:

$$I_{max}^j = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \frac{I_R^2}{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2} (P_{EC-R})}} \quad (3.6)$$

Koristeći K faktor i informacije o parametrima transformatora, kvadratni koren maksimalne dozvoljene vrednosti struje transformatora može se definisati i na sledeći način:

$$I_{max}^j = \sqrt{\frac{R_{DC} + (R_{EC-R})(1 - K) - \frac{(\Delta P_{fe} + \Delta P_{OSL})}{I_R^2}}{R_{DC}}} \quad (3.7)$$

gde:  $R_{DC} = R_{DCprimarno} + R'_{DCsekundarno}$  je ukupni DC otpor namotaja transformatora.  $R_{EC-R}$  je pretpostavljeni dodatni otpor usled vrtložnih struja. Dalje:

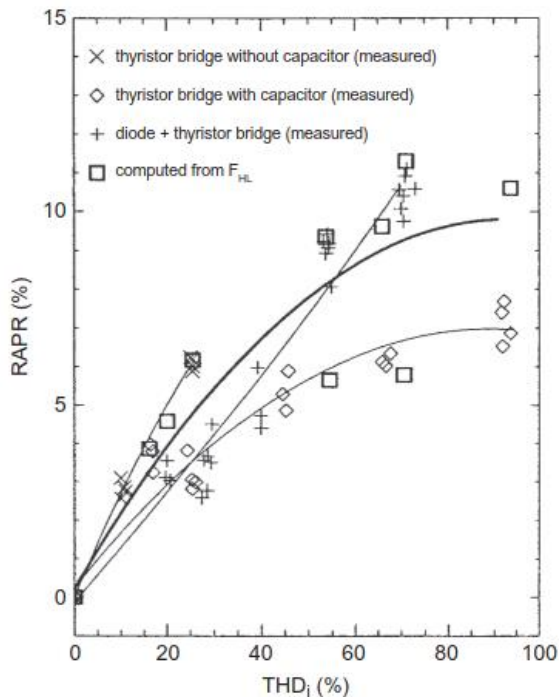
$$\begin{aligned} \Delta P_{fe} &= \sum_{h=1}^{h \max} P_{feh} - P_{feR}, \\ \Delta P_{OSL} &= \sum_{h=1}^{h \max} P_{OSLh} - P_{OSLR}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

$\Delta P_{fe}$  je razlika između ukupnih gubitaka u gvožđu (uključujući harmonike) i procenjenih gubitaka u gvožđu bez harmonika.  $\Delta P_{OSL}$  je razlika između ukupnih preostalih gubitaka (uključujući harmonike) i procenjenih ostalih gubitaka bez harmonika.

Smanjenje prividne snage (RAPR) je:

$$RAPR = 1 - \left( \frac{V_{rms}^{nelinearno}}{V_{rms}^{rat}} \right) I_{max}^j \quad (3.9)$$

gde su  $V_{2rms}^{nelinearno}$  i  $V_{2rms}^{rat}$  ukupna vrednost kvadratnog korena napona sekundara transformatora uključujući harmonike, i pretpostavljena vrednost kvadratnog korena sekundarnog namotaja bez harmonika, redom.



Slika 3.1 Izmereno smanjenje opsega prividne snage (RAPR) jednofaznog transformatora snage 25kVA u funkciji ukupnog harmonijskog izobličenja struje ( $THD_i$ ), gde su treći i peti harmonik izraziti.

#### 4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je izvršiti pregled i analizu modela transformatora i asinhronih mašina u harmonijskom okruženju. Izbor je pao na ova dva uređaja jer su transformatori izuzetno bitan element sistema, a asinhroni motor elektromotornih pogona, i kao takvi u značajnoj meri utiču na kvalitet.

U radu su dati analitički izrazi i proračuni dejstva navedenih uređaja u uslovima poremećaja koji dolaze iz električne mreže, ali dat je i osvrt na njihovu osobinu da unose više harmonike, pre svega usled nelinearnih pojava u njihovom magnetnom jezgru.

#### 5. LITERATURA

- [1] Stoffel, T.; Andreas, A. (2008). Sun Spot One (SS1): San Luis Valley, Colorado (Data). NREL Report No. DA-5500-56507. <http://dx.doi.org/10.5439/1052452> Accessed May 8, 2015. This image has been reprinted with permission from the National Renewable Energy Laboratory.
- [2] Allen E, Kosterev DN, Pourbeik P. Validation of power system models. In: 2010 IEEE Power and Energy Society general meeting, Minneapolis, MN. doi:10.1109/PES.2010.5589874.
- [3] Miller NW, Sanchez Gasca JJ, Price WP, Delmerico RW. Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine-generators for stability simulations, 0-7803-7989-6/03@2003 IEEE.
- [4] Wang Q, Chang L. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems. IEEE Trans Power Electron 2004;19(5):1242–9.

#### Kratka biografija:

**Marko Stojanović** je rođen je u Novom Sadu 1994. god. Završio gimnaziju Isidora Sekulić u Novom Sadu. Osnovne akademske studije i odbranu diplomskog rada završio na Fakultetu tehničkih nauka 2018. godine. Trenutno zaposlen u kompaniji Strabag.

**Marko Vekić** je vanredni profesor na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblasti interesovanja su mu energetska elektronika u prenosnim i distributivnim mrežama, mikromreže i kvalitet električne energije.