

**ANALIZA POREMEĆAJA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE KROZ
SIMULACIJU I MERENJA****POWER QUALITY DISTURBANCES ANALYSIS THROUGH SIMULATIONS AND
MEASUREMENTS**Stefan Pajkanović, Marko Vekić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj: U radu su predstavljeni modeli koji simuliraju propade napona usled kratkog spoja, kao i propad napona usled pokretanja asinhronog motora. Pored toga prikazan je uticaj priključenja kondenzatorskih baterija na električnu mrežu. Na kraju rada prikazan je dijagram promjene ukupnog harmonijskog izobličenja po fazama, čije mjerenje je izvršeno na glavnoj crpnoj stanici u Novom Sadu.

Ključne riječi: kvalitet električne energije, analiza poremećaja, transformator, propad napona

Abstract – This paper describes the models that simulate the voltage drops due to a short circuit, as well as the voltage drop due to starting of an asynchronous motor. In addition, the impact of connecting condenser capacitor bank to the electrical network is shown. At the end of the paper, a diagram of the change in total harmonic distortion by phase is shown, which was measured in the main pumping station in Novi Sad.

Keywords: power quality, analysis of disturbances, transformer, voltage drop,

1. UVOD

Pojam kvaliteta električne energije dobija na velikom značaju iz nekoliko razloga, kao što su: povećanje korišćenja osjetljive opreme i uređaja, povećanog korišćenja opreme i potrošača koji dovode do „zagađenja“ električne mreže, povećanog uvezivanja elektroenergetskih sistema, itd. Zbog snažnog međudejstva [1] potrošača i električne mreže (potrošači međusobno trpe, ali i uzrokuju poremećaje), potrebno je utvrditi oblasti ograničenja i standarde kvaliteta električne energije.

Praćenje mjerenja kvaliteta električne energije [2] ima veliki značaj u fazi održavanja jer, u toku rada dolazi do poremećaja koji učestvuju u narušavanju standardnih uslova rada, stoga mjerenjem i nadzorom se omogućava utvrđivanje uzroka i mogućnost pronalaska kvara.

S druge strane, simulacijama [3] je moguće predvidjeti razne scenarije u toku projektovanja nekog sklopa.

NAPOMENA:

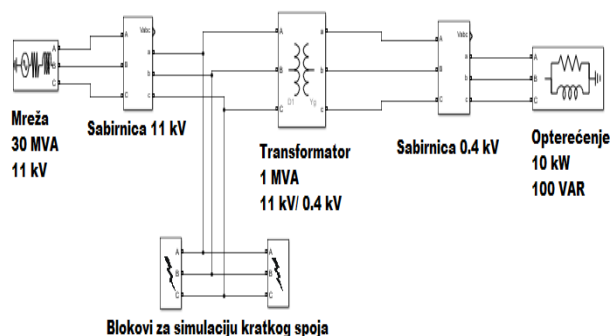
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Vekić, vanr. prof.

2. ANALIZA POREMEĆAJA SIMULACIJAMA

Kreirani su modeli koji simuliraju pojave koje se dešavaju u datom elektroenergetskom sistemu [4] kao što su propadi napona nastali prilikom kratkog spoja, kao i propad napona usled pokretanja asinhronog motora. Za modelovanje i simulaciju modela korišteno je softversko okruženje MATLAB/Simulink -a.

2.1 Uticaj transformatora na propad napona usljed kratkog spoja

Na slici 1 prikazan je model koji simulira propad napona na sekundaru transformatora pri kratkom spoju na njegovom primaru. Posmatrani sistem se sastoji od izvora napajanja nazivne snage 30 MVA, napona 11 kV i frekvencije 50 Hz. Preko transformatora prenosnog odnosa 11 kV/0.4 kV i snage 1 MVA povezano je na mrežu sa niskonaponske strane opterećenje aktivnom snagom 10 kW i reaktivnom snagom 100 VAR. Kratak spoj se simulira preko blokova koji prespajaju fazne provodnike u kojima se simulira kvar.

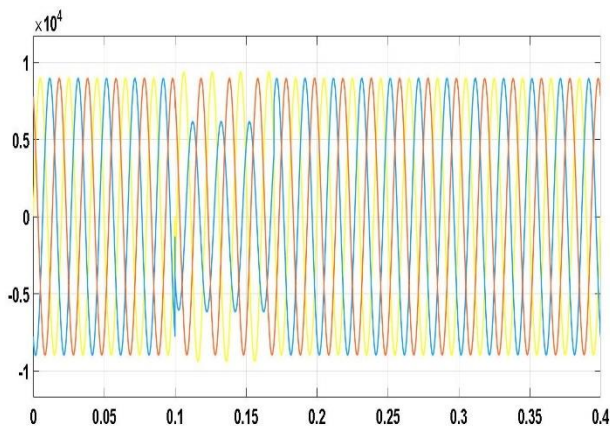


Slika 1. Simulacija propada napona pri kratkom spoju

Na slici 2 prikazan je dvopolan kratak spoj faza A i B sa zemljom na visokonaponskoj strani transformatora.

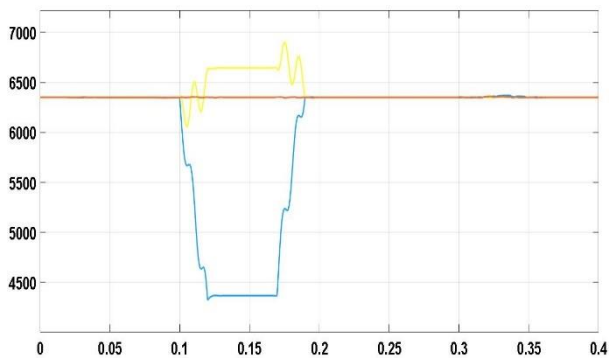
Kratak spoj je simuliran u trenutku od 0.1 do 0.168 sekundi, dok ukupno trajanje simulacije iznosi 0.4 sekunde.

Žutom linijom je predstavljena faza A, plavom faza B i na kraju crvenom faza C. Posmatrajući sliku 2. može se uočiti značajan propad napona faze B pri kratkom spoju, dok je vrijednost faze A nešto iznad nominalne vrijednosti napona na visokonaponskoj strani transformatora. Dok amplituda napona faze C ostaje ista.



Slika 2. Dvopolni kratak spoj sa zemljom između faza A i B na visokonaponskoj strani transformatora

Efekat kvara, odnosno poslednične promjene napona se jasnije uočavaju sa slike 3 na kojoj su prikazane efektivne vrijednosti napona.



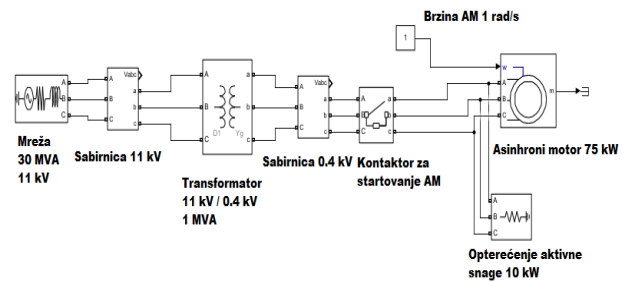
Slika 3. Efektivna vrijednost propada napona usled dvopolnog kratkog spoja na visokonaponskoj strani transformatora

2.2 Propad napona pri pokretanju asinhronog motora

Kada je u pitanju propad napona koji nastaje prilikom pokretanja asinhronog motora, on je posljedica velikih struja koje motor povlači iz mreže, koje su 5 do 7 puta veće od nazivnih vrijednosti.

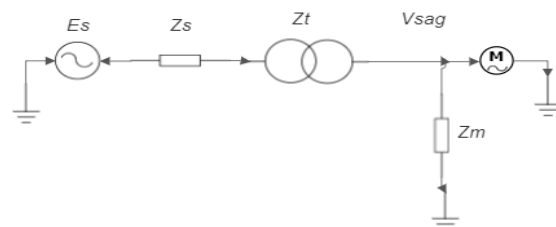
Ovakve struje uključjenja obično uzrokuju propad napona dubine do 15 % od nazivnih vrijednosti. Dubina propada napona koja nastaje prilikom pokretanja asinhronog motora zavisi od impedanse mreže. Sa porastom impedanse, padovi napona u mreži su veći, dok dubina propada napona zavisi i od snage asinhronog motora. Dok trajanje propada napona zavisi od inercije motora i njegovog opterećenja.

Na slici 4 prikazan je model koji simulira propad napona koji nastaje prilikom pokretanja asinhronog motora. Model se sastoji od izvora napajanja snage 30 MVA, napona 11 kV, visokonaponske sabirnice 11 kV, transformatora snage 1 MVA i prenosnog odnosa 11 kV/0.4 kV, sabirnice 0.4 kV, kontaktora za startovanje asinhronog motora koji se uključuje u trenutku od 0.08 sekundi, pri čemu je ukupno trajanje simulacije 0.4 sekunde, asinhronog motora snage 75 kW, kao i čisto aktivnog opterećenja snage 10 kW.



Slika 4. Simulacija propada napona pri pokretanju asinhronog motora

U nastavku rada će biti prikazan proračun propada napona asinhronog motora prilikom njegovog pokretanja. Na slici 5 je prikazana ekvivalentna šema datog sistema, koji se sastoji od izvora napajanja, transformatora i trofaznog asinhronog motora. Odgovarajući model iz MATLAB/Simulinka prikazan je na slici 4. U nastavku će biti proračunat propad napona V_{sag} prilikom pokretanja asinhronog motora.



Slika 5. Šema pokretanja asinhronog motora

Propad napona V_{sag} koji nastaje prilikom pokretanja asinhronog motora, se može proračunati na osnovu naponskog razdjelnika, čiji je izraz dat u sledećoj relaciji:

$$V_{sag} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_s + Z_t} \cdot E_s = \frac{0,61}{0,61 + 4,03 + 27,5} \cdot 11000 \quad (1)$$

$$V_{sag} = \frac{0,61}{32,14} \cdot 11000 = 207,9 \text{ V}$$

Pri čemu je:

V_{sag} – Propad napona prilikom pokretanja asinhronog motora

Z_m – Impedansa motora.

Z_s – Impedansa izvora napajanja.

Z_t – Impedansa transformatora.

Impedansa motora se računa po sledećoj relaciji:

$$Z_m = \frac{V_n^2}{\beta \cdot S_{motor}} = \frac{400^2}{3,5 \cdot 75 \cdot 10^3} = \frac{121000}{262,500} = 0,61 \Omega \quad (2)$$

Pri čemu je:

V_n – Nominalan napon asinhronog motora.

S_{motor} – Snaga asinhronog motora.

β – Vrijednost koja predstavlja koliko je puta struja polaska veća od nominalne.

Impedansa izvora napajanja se računa na osnovu sledeće relacije:

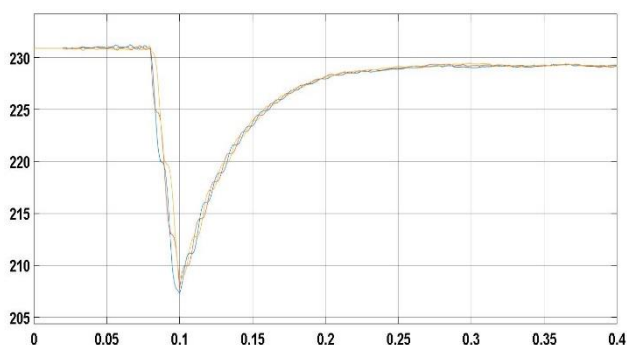
$$Z_s = \frac{V_n^2}{S_s} = \frac{11000^2}{30 \cdot 10^6} = \frac{121 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^6} = 4,03 \Omega \quad (3)$$

Pri čemu je: S_s – Snaga izvora napajanja.

Impedansa transformatora se računa po sledećoj relaciji:

$$Z_t = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{11000}{400} = 27,5 \Omega \quad (4)$$

Na slici 6 je prikazana efektivna vrijednost propada napona na niskonaponskoj strani transformatora prilikom pokretanja asinhronog motora napajano sa sekundarne strane u direktnom startu. Može se uočiti da dubina propada napona iznosi oko 10 % od nazivne vrijednosti napona prilikom pokretanja, potom vraćanje vrijednosti napona na nominalnu vrijednost, pri dostizanju nominalne brzine asinhronog motora.



Slika 6. Efektivna vrijednost propada napona na niskonaponskoj strani transformatora 0,4 kV

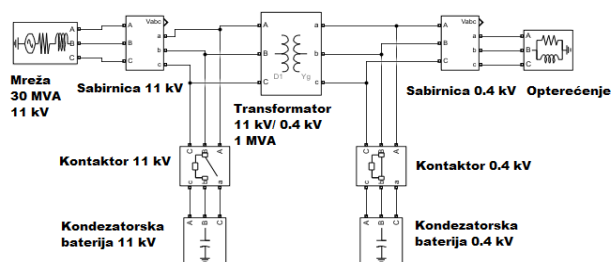
2.3 Uticaj priključenja kondenzatorskih baterija na električnu mrežu

Prilikom priključenja kondenzatorske baterije na mrežu, u cilju popravke faktora snage, dolazi do pojave oscilatornih prelaznih pojava. Oscilatorni tranzijent je iznenadna pojava koje ne uzrokuje promjene frekvencije ustaljenog stanja napona, struje ili obje veličine. Jedan oscilatorni tranzijent sastoji se od napona ili struje čija vrijednost brzo mijenja znak. On se opisuje spektralnim sastavom (pretežno frekvencijom), trajanjem i amplitudom.

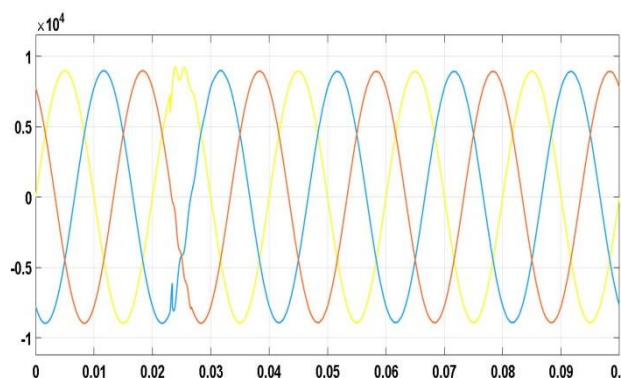
Prilikom priključenja kondenzatorske baterije u prenosnu ili distributivnu mrežu dolazi do pojave tranzijenta niske frekvencije, čija je osnovna frekvencija manja od 5 kHz, a trajanje od 0,3 ms do 50 ms. Na slici 7 je prikazan model za simulaciju naponskog tranzijenta usljed priključenja kondenzatorskih baterija. Model se sastoji od mreže snage 30 MVA, napona 11 kV, potom visokonaponske sabirnice 11 kV, transformatora prenosnog odnosa 11 kV/0,4 kV, snage 1 MVA, spregne trougao/zvezda, zatim opterećenja na niskonaponskoj strani aktivne snage 100 kW i reaktivne 100 kVAr. Između visokonaponske sabirnice i transformatora je preko kontaktora, paralelno povezana kondenzatorska baterija snage 100 kVAr, dok se na niskonaponskoj strani, nalazi kondenzatorska baterija manje snage od 40 kVAr.

Na slici 8 prikazana je pojava oscilatornog naponskog tranzijenta na visokonaponskoj strani transformatora, usljed priključenja kondenzatorske baterije na niskonaponskoj strani transformatora. Može se uočiti da imamo manju pojavu oscilatornog tranzijenta na visokonaponskoj

strani transformatora, koja je posljedica velike snage izvora napajanja.

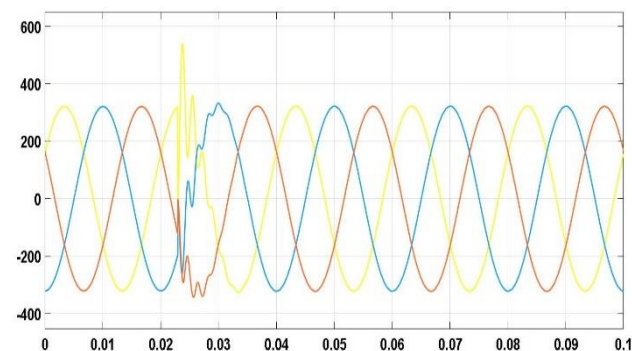


Slika 7. Model za simulaciju naponskih tranzijeneta usljed priključenja kondenzatorskih baterija



Slika 8. Pojava naponskog tranzijenta na visokonaponskoj strani 11 kV

Pojave na niskonaponskoj strani daleko su izraženije, što možemo uočiti na slici 9. Oscilatorni naponski tranzijent zavisi od veličine kondenzatorske baterije. Kondenzatorske baterije veće snage uzrokuju veću pojavu oscilatornog naponskog tranzijenta prilikom priključenja na mrežu. Brzina smirivanja oscilatornih pojava, zavisi od veličine opterećenja aktivnom snagom. Veće opterećenje aktivnom snagom dovodi do većeg faktora prigušenja i samim tim bržeg smirivanja prelaznih pojava samih oscilacija.

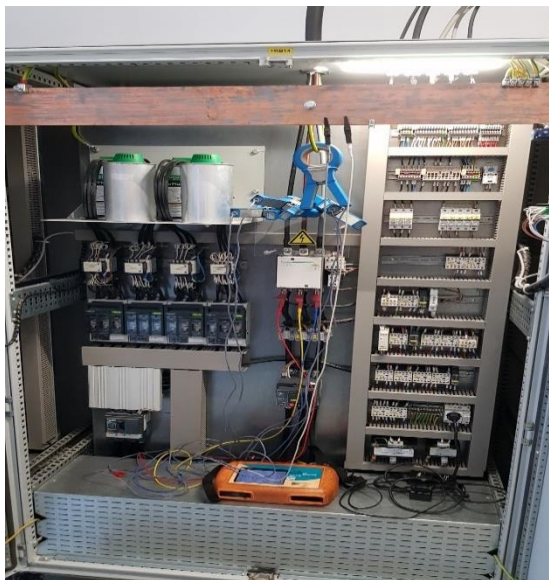


Slika 9. Pojava naponskog tranzijenta na niskonaponskoj strani 0,4 kV

3. ANALIZA POREMEĆAJA MJERENJIMA

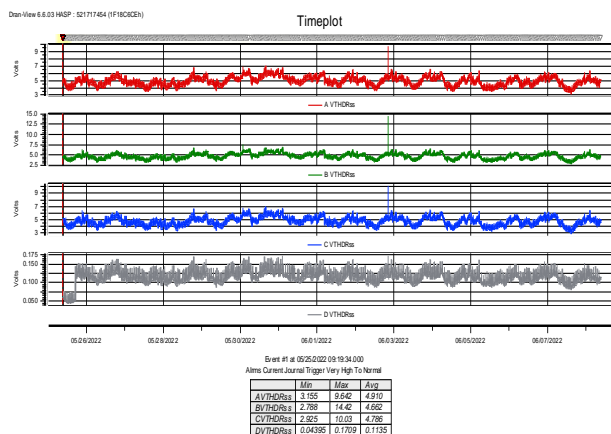
Dana 26.05.2022. izvršeno je mjerenje kvaliteta električne energije na glavnoj crpnoj stanici (NGC) u Novom Sadu, nedaleko od Žeželjevog mosta. Mjerenje je izvršeno na razvodnom ormanu RB14, koji je napajan putem

transformatorske stanice prenosnog odnosa 10/0.4 (KV/KV). Na sabirnicu ovog razvodnog ormara je povezana pumpa C1, asinhroni motor snage 90 KW i 176 A, čija je uloga prečišćavanje otpadnih voda. Mjerenje je izvršeno u trajanju od 12 dana, u periodu od 26.05.2022 do 07.06.2022. Za dobijanje potrebnih rezultata mjerenja korišten je uređaj Dranetz PowerGuide 4400. Na slici 10 prikazano je mjerno mjesto, gdje možemo uočiti strujna klješta koja su povezana na tri faze i neutralni vod: L1, L2, L3 i N, tj. u pitanju je trofazno četverožično mjerenje. Pored toga, povezane su i naponske sonde za mjerenje napona.



Slika 10. Prikaz mjernog mjesta

Na slici 11 je prikazan dijagram promjene ukupnog harmonijskog izobličenja napona po fazama u posmatranom vremenu (Eng. THDU – Total harmonic distortion voltage). Sa dijagrama se vidi da, iako je THD u nekim trenucima značajan, u prosjeku ne prelazi 5 %.



Slika 11. Dijagram promjene ukupnog harmonijskog izobličenja po fazama

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad se bazira na razvoju simulacionih modela u MATLAB/simulink softverskom okruženju. Prvobitno je predstavljen model koji simulira propad napona usljed pokretanja asinhronog motora. Prikazani su proračuni koji reprezentuju propad napona prilikom direktnog pokreta-

nja asinhronog motora, čiji rezultat verodostojno potvrđuju rezultati simulacije. Nakon toga prikazan je model koji simulira propad napona usljed dvopolnog kratkog spoja, kao i model koji simulira naponske tranzijente usljed priključenja kondenzatorskih baterija. Na kraju rada je predstavljena analiza poremećaja kvaliteta električne energije mjerenjima, koje je izvršeno na glavnoj crpnoj stanici u Novom Sadu u trajanju od 10 dana. Prikazano je mjerno mjesto i način povezivanja uređaja za mjerenje. Naposljetku je prikazan dijagram promjene ukupnog harmonijskog izobličenja po fazama.

Rezultati simulacija predstavljaju svojstvene događaje koji se javljaju u elektroenergetskom sistemu, a koji mogu biti od značaja prilikom projektovanja, jer se simulacijama mogu predvidjeti razni scenariji prilikom projektovanja nekog sklopa.

5. LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Soliman SA, Temraz HK, El-Khodary SM. Power system voltage stability margin identification using local measurements. In: 2003 power engineering conference proceedings. Energy for the future (Cat. No.03EX691). doi:10.1109/LESCPE.2003.1204669.
- [3] Liu Y, Lamine Mili L, De La Ree J, Nuqui RF. State estimation and voltage security monitoring using synchronized phasor measurement. Research paper from work sponsored by American Electric Power, ABB Power T&D Company, and Tennessee Valley Authority, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001-07-12.
- [4] IEC 61000-3-2(2001-10) consolidated edition. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits for harmonic current emissions.

Kratka biografija:



Stefan Pajkanović rođen je u Bijeljini 11. januara 1996. godine. Srednju elektrotehničku školu završio je u Loparama 2015. god. Iste godine je upisao na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu smjer energetika, elektronika i telekomunikacije. Osnovne akademske studije završio je 2021. godine. Iste godine je upisao master akademske studije.



dr Marko Vekić diplomirao je 2005. godine na Fakultetu tehničkih nauka, smjer energetska elektronika i električne mašine. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2014. godine. Zaposlen je na katedri za energetska elektroniku i električne pretvarače. Oblasti interesovanja su energetska elektronika u distributivnim i pametnim mrežama, kvalitet električne energije, decentralizovane pametne električne mreže.

Kontakt: vekmar@uns.ac.rs