



MERENJE DINAMIČKOG ELEKTROMAGNETSKOG MOMENTA PRI ZALETANJU VISOKONAPONSKOG ASINHRONOG MOTORA

Dragan Petrović, Zoran Lazarević, Nikola Laketić

Elektrotehnički Fakultet u Beogradu

Sadržaj: U radu je izložen postupak za numeričko izračunavanje dinamičkog elektro-agnetskog momenta na osnovu napona i struja snimljenih tokom zaletanja asinhronog motora. Dati su i analitički izrazi za određivanje udarnog dinamičkog momenta i izvršeno je poređenje dobijenih rezultata.

Ključne reči: visokonaponski asinhroni motor, zaletanje, udarni dinamički momenat, numeričko izračunavanje momenta

1. UVOD

U pogonu Energane SARTIDA u Smederevu postoji problem pucanja vratila pumpi za Visoku peć i Energanu. Pumpe za Visoku peć pokreću se visokonaponskim elektromotorima proizvođača SEVER Subotica, snaga 630 kW i 450 kW. Do pucanja vratila dolazi tokom starta elektromotora. Da bi se utvrdili uzroci pucanja vratila, pomoću savremene merne opreme izvršeno je snimanje procesa polaska pomenutih elektromotora, i na osnovu snimljenih podataka izvršene su analize elektromagnetnog momenta. Pored eksperimentalnog snimanja momenta, izvršena su i odgovarajuća analitička izračunavanja, te su u radu upoređeni eksperimentalni i analitički dobijeni rezultati.

2. ANALITIČKI IZRAZI ZA POLAZNI MOMENAT

Kao najbolja procena udarnog dinamičkog momenta asinhronne mašine uzet je maksimalni polazni momenat motora sa ukočenim rotorom. Ova veličina može se izračunati analitički na osnovu parametara mašine i jednačina poznatih iz teorije električnih mašina [1], [3] i [4]. Trenutna vrednost dinamičkog momenta asinhronne mašine sa ukočenim rotorom tokom polaska data je sledećim jednačinama:

$$\frac{m_e}{M_e} = m_{d1} + m_{d2} + m_{d3} + m_{d4}$$

$$m_{d1} = 1$$

$$m_{d2} = e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)t}$$

$$m_{d3} = -(A \sin(\omega_0 t) + \cos(\omega_0 t))e^{-\frac{t}{T_1}}$$

$$m_{d4} = (A \sin(\omega_0 t) - \cos(\omega_0 t))e^{-\frac{t}{T_2}}$$

gde su:

$$T_1, T_2 = \frac{1}{2} \left[T_s + T_r \pm \sqrt{(T_s + T_r)^2 - 4sT_s T_r} \right],$$

vremenske konstante asinhronne mašine pri ukočenom rotoru,

$$T_s = \frac{L_s}{r_s}, \text{ - vremenska konstanta statora,}$$

$$T_r = \frac{L_r}{r_r}, \text{ - vremenska konstanta rotora i}$$

$$s = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \text{ koeficijent rasipanja,}$$

$$M_e = 3MpU^2 \frac{Z_r Z_m}{Z_c^4} \cos j_r, \text{ statički polazni}$$

momenat,

$$A = \frac{1 + sT_s T_r \omega_0^2}{\omega_0 \sqrt{(T_s + T_r)^2 - 4sT_s T_r}}$$

Z_r – impedansa rotora,

Z_s – impedansa statora,

Z_c – impedansa kratkog spoja,

$L_s = L_{ss} + M$ – induktivnost statorskog namotaja,

$L_r = L_{sr} + M$ – induktivnost rotorskog namotaja,

M – međusobna induktivnost,

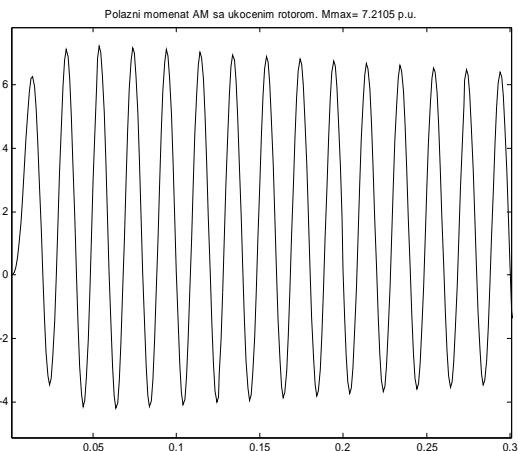
L_s – induktivnost rasipanja,

r_s – omska otpornost statorskog namotaja,

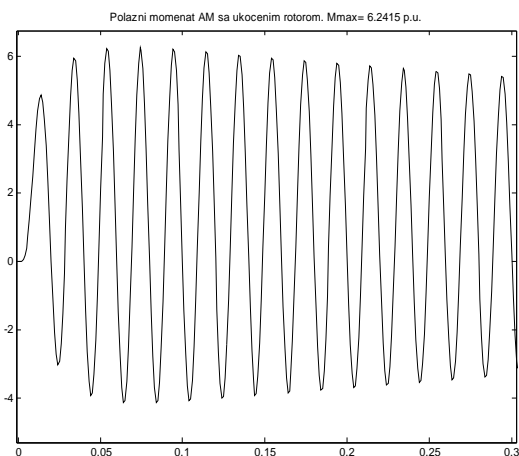
r_r – omska otpornost rotorskog namotaja.

Na osnovu gornjih jednačina i parametara motora dobijenih od proizvođača, simulacijom u MatLabu 6.0 izračunat je dinamički polazni momenat motora sa ukočenim rotorom i njegove komponente.

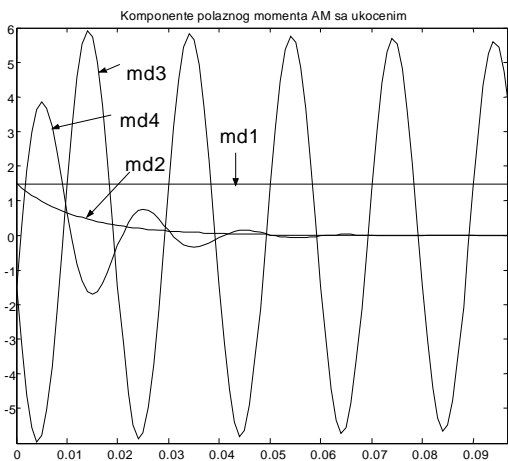
Na slikama 1. i 2. prikazani su polazni momenti motora 630 kW i 450 kW dobijeni analitičkim izrazima. Na slikama 3. i 4. prikazane su komponente polaznih momenata motora. Vrednosti parametara motora date su u Dodatku 1.



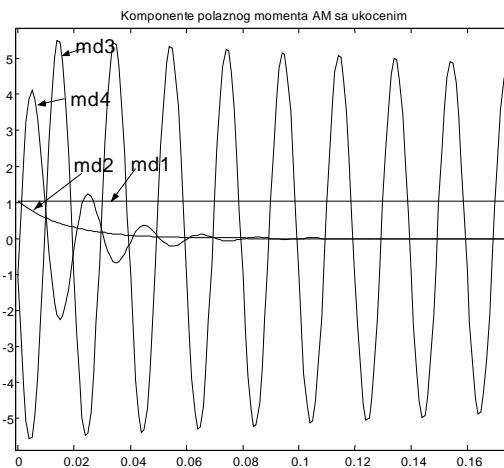
Slika 1. Polazni dinamički momenat motora 630 kW dobijen simulacijom.



Slika 2. Polazni dinamički momenat motora 450 kW sa ukocenim rotorom, dobijen simulacijom



Slika 3. Komponente polaznog momenta motora 630 kW



Slika 4. Komponente polaznog momenta motora 450 kW

Simulacija polaska predmetnih motora sa ukočenim rotorima pokazala je da se za motor od 630 kW može očekivati udarni momenat od 7.21 pu, a za motor od 450 kW 6.24 pu.:

Tabela 1: Analitički izračunate vrednosti udarnog elektromagnetskog momenta

Motor 630 kW	7.21 p.u.
Motor 450 kW	6.24 p.u.

3. DIGITALNO SNIMANJE ZALETANJA MOTORA

Da bi se utvrdilo kolike su realne polazne struje i momenti, pristupilo se digitalnom snimanju procesa zaletanja motora, tj. merenju trenutnih vrednosti napona i struja motora u toku starta i njihovoj naknadnoj analizi. Analizom snimljenih napona i struja, izračunate su sledeće karakteristične veličine za polazak svakog od motora: dinamički polazni momenat, statički polazni momenat, udarna struja, ustaljena struja polaska, napon pre i tokom polaska, relativni pad napona tokom polaska, vreme zaletanja.

Na svakom od motora izvršene su dve serije merenja:

Seriya 1: koristeći signale sa postojećih mernih strujnih i naponskih transformatora, preko naponskih pretvarača i strujnih klješta;

Seriya 2: pomoću visokonaponskih kapacitivnih delitelja napona i strujnih pretvarača.

Karakteristike opreme kojom je izvršeno snimanje navedene su u Dodatku 2.

U obe serije merenja signali sa mernih pretvarača i transformatora memorisani su pomoću akvizicionog sistema baziranog na PC platformi sa akvizicionom karticom ED 2000 i odgovarajućeg hardvera za kondicioniranje ulaznih signala. Da bi se proces merenja obavljao automatski i prema unapred utvrđenim kriterijumima, za tu svrhu je formiran softverski paket u programskom jeziku Pascal. Kartica je opremljena multiplexerom sa 8 analognih ulaza za sinhronizovano

merenje do 8 ulaznih veličina. Rezolucija analognog/digitalnog konvertora iznosi 12 bita. Ulazni signali su prilagođavani na naponski opseg ± 10 V. Učestanost odabiranja iznosila je 3000 Hz po kanalu. Kao rezultat merenja dobijaju se ASCII fajlovi koji su omogućili kompletnu obradu sa programskim paketom MatLab 6.0.

4. NUMERIČKO IZRAČUNAVANJE MOMENTA

Ovako dobijene struje i naponi su poslužili za numerički proračun elektromagnetnog momenta u toku pokretanja. Za računanje momenta korišćena je metoda predložena u [2]. Izraz za elektromagnetni momenat u relativnim jedinicama dat je sa:

$$T_{p.u.} = \frac{2}{3\sqrt{3}} [i_a(y_c - y_b) + i_b(y_a - y_c) + i_c(y_b - y_a)]$$

gde su y_a, y_b, y_c , fluksni obuhvati statorskih namotaja; i_a, i_b, i_c , fazne struje. Ovaj izraz je precizan pod sledećim pretpostavkama: reaktanse rasipanja u sve tri faze su identične, raspodela gustine navojaka je sinusna, da je magnetno kolo simetrično, da je međugvožđe konstantno. Ukoliko navedeni uslovi nisu ispunjeni javlja se greška u računanju momenta.

Kada fluksne obuhvate zamenimo sa:

$$y_a = \int (V_a - r i_a) dt,$$

$$y_b = \int (V_b - r i_b) dt,$$

$$y_c = \int (V_c - r i_c) dt,$$

i posle kraćeg sređivanja, dobija se izraz za momenat u relativnim jedinicama:

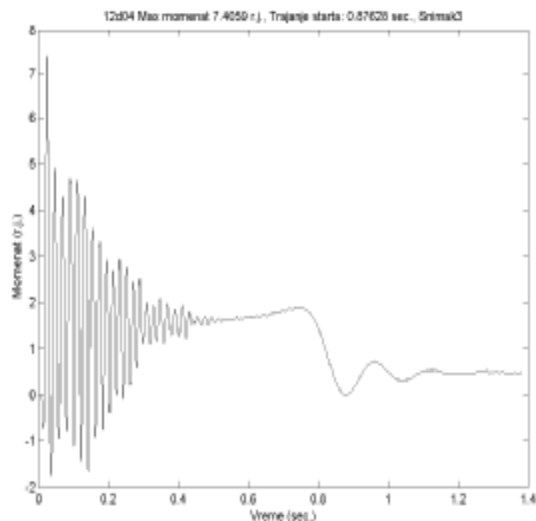
$$T_{p.u.} = \frac{2}{3\sqrt{3}} (i_a - i_b) \int [V_{ca} - r(i_c - i_a)] dt - \frac{2}{3\sqrt{3}} (i_c - i_a) \int [V_{ab} - r(i_a - i_b)] dt$$

Na osnovu ovog izraza i snimljenih trenutnih vrednosti napona i struja tokom starta motora, računat je elektromagnetski momenat predmetnih motora tokom starta.

Zbog nesavršenosti opreme kojom je izvršeno snimanje napona i struja, pre svega AD konvertora i strujnih klješta, signali sadrže određeni nivo šuma i DC ofseta. Nivo ovih parazitnih signala nije visok – tipično 1-2% ali je zbog velike osetljivosti integracionog algoritma na postojanje ofseta i šuma u signalu, potrebno filtrirati snimljene signale. U tom cilju izvršeno je uklanjanje ofseta iz napona i struja primenom MatLab funkcije *detrend()* na snimljene podatke. Nakon uklanjanja ofseta naponi i struje su numerički isfiltrirani digitalnim Čebiševljevim filtrom tip 1, propusnikom niskih učestanosti. Empirijskim putem ustanovljeno je da najbolje rezultate daje filter devetog stepena, ripl u propusnom opsegu 0.01 db, i ivičnom frekvencijom 150 Hz. [5]

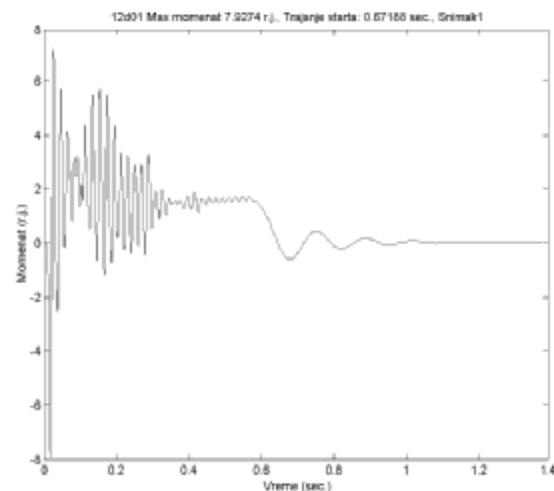
Numerička integracija podintegralne funkcije izvršena je u programu MatLab 6.0 ugrađenom funkcijom *trapz()*, koja koristi trapezoidno pravilo.

Na slici 5. i 6. prikazani su polazni momenti motora 630 kW računati numeričkim putem na napred opisan način. Prilikom starta sa slike 5 naponi i struje snimljeni su sa naponskih i strujnih mernih transformatora uz pomoć naponskog pretvarača i strujnih klješta. Prilikom starta sa slike 6. naponi i struje su snimljeni sa VN strane uz pomoć kapacitivnih delitelja napona i strujnih pretvarača.

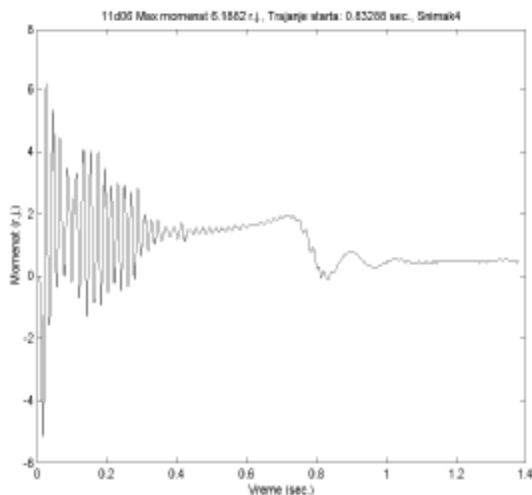


Slika 5. Polazni dinamički momenat motora 630 kW (serija 1)

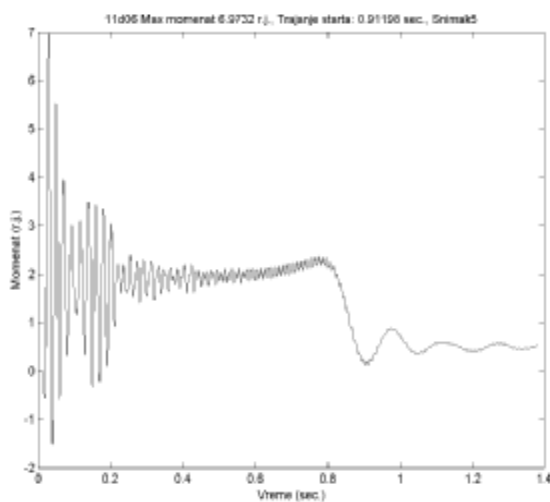
Na slikama 7. i 8. prikazani su polazni momenti motora 450 kW računati numeričkim putem. Za sliku 7. naponi i struje su snimljeni sa NN strane, a za sliku 8. sa VN strane.



Slika 6. Polazni dinamički momenat motora 630 kW (serija 2).



Slika 7. Polazni dinamički momenat motora 450 kW (serija 1)



Slika 8. Polazni dinamički momenat motora 450 kW (serija 2).

Na osnovu izmerenih vrednosti napona i struja, i digitalnog računanja dinamičkog momenta predmetnih motora došlo se do vrednosti za udarni momenat prikazanih u Tabeli 2:

Tabela 2. Udarne vrednosti momenta

Motor	Momenat (pu)
630 kW (slika 5., serija 1)	7.4
630 kW (slika 6., serija 2)	7.9
450 kW (slika 7., serija 1)	6.2
450 kW (slika 8., serija 2)	7.0

Snimanje napona i struja na predmetnim motorima je vremenski dugo trajalo (dve radne smene), te nivo napona u mreži nije bio isti za sve oglede – na kraju smene napon je bio viši, a tokom smene niži od nominalnog. U cilju što preciznijeg poređenja izmerenih i analitički dobijenih vrednosti udarnog momenta, izvršeno je preračunavanje snimljenih vrednosti na nivo nominalnog napona – tj. na nivo za koji su urađene simulacije. Rezultati preračunavanja su dati u Tabeli 3.

Tabela 3. Udarne vrednosti momenta za nominalnu vrednost napona:

Motor	Momenat (pu)
630 kW (slika 5., serija 1)	7.4
630 kW (slika 6., serija 2)	7.5
450 kW (slika 7., serija 1)	5.9
450 kW (slika 8., serija 2)	6.3

Ovi rezultati su veoma bliski vrednostima dobijenim simulacijom na osnovu analitičkih izraza (Tabela 1) za momenat mašine sa ukočenim rotorom. U Tabeli 4. data su relativna odstupanja izmerenog (Tabela 3) i izračunatog (Tabela 1) udarnog momenta.

Tabela 4: Relativna razlika između izmerene i analitički izračunate vrednosti udarnog momenta:

Motor	Momenat (pu)
630 kW (slika 5., serija 1)	2,5 %
630 kW (slika 6., serija 2)	3,9 %
450 kW (slika 7., serija 1)	5,8 %
450 kW (slika 8., serija 2)	1,6 %

Maksimalno relativno odstupanje izmerene i analitički izračunate vrednosti udarnog momenta ne prelazi 5.8%. To znači da se vrednosti udarnog dinamičkog momenta dobijene na osnovu analitičkih izraza za dinamički momenat asinhronog motora sa ukočenim rotorom mogu koristiti za proračun naprežanja i dimenzionisanja vratila motora i pomoćne mašine.

Poređenje rezultata merenja iz serije 1 i serije 2, ukazuje da se za svrhe proračuna dinamičkog elektromagnetskog momenta motora mogu koristiti merenja napona i struja preko postojećih mernih transformatora. Nema potrebe za korišćenjem specijalnih naponskih i strujnih sondi za visoki napon.

5. ZAKLJUČAK

U radu su na osnovu merenja dva linijska napona i dve struje visokonaponskog asinhronog motora u toku zaletanja dobijene zavisnosti dinamičkog elektromagnetskog momenta. Merenja su vršena koristeći postojeće merne naponske i strujne transformatore, kao i kapacitivne delitelje napona i visokonaponske strujne pretvarače.

Ovako dobijene vrednosti upoređene su sa analitičkim proračunom. Rezultati se slažu u granicama greške merenja i tačnosti sa kojom poznajemo vrednosti parametara motora.

Analitički proračun može da posluži kao pouzdan način za određivanje udarnih dinamičkih momenata koji se koriste za proračun naprežanja i dimenzionisanja vratila u toku zaletanja visokonaponskih asinhronih motora.

Dodatak 1

Podaci o visokonaponskim elektromotorima proizvođača SEVER Subotica:

- KZ 6450-Mb 6, 6 kV, 630 kW, 75 A, 990 ob./min..
- KZ 6450-Mb 8, 6 kV, 450 kW, 58 A, 743 ob./min..

Dodatak 2

Karakteristike merne opreme iz Serije 1:

- naponski merni transformatori 6000/100 V
- strujni merni transformatori 75/5 A tj. 50/5 A.
- strujna klješta PK100, 10000 / 1 A
- naponski pretvarač LEM 400V / 50 mA.

Karakteristike merne opreme iz Serije 2:

- naponske merne sonde Hammeg 15 kV/15 V
- strujni merni pretvarači LEM 1000/1 A.

6. LITERATURA

- [1] M.M. Sokolov, "Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе" Энергия Москва, 1967.
- [2] J.S. Hsu, H.H. Woodson, W.F. Weldon, "Possible errors in measurement of air-gap torque pulsations of induction motor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1, March 1992, pp.202-208.

- [3] D. Petrović, "Prelazne pojave u električnim mašinama", skripte sa predavanja na postdiplomskim studijama Elektrotehničkog Fakulteta u Beogradu.
- [4] J. Chatelain, "Machines électriques: Tome 1", Dunod Saint-Etienne, 1984.
- [5] R.Radosavljević, Z. Lazarević, Dj. Kalić, "Some new aspects of the digital two speed method for assessing transient torques of AC Motors and choice of an optimal algorithm for filtering the measured data", ICEM 1998, Proceedings Vol. 1, pp. 233-238.
- [6] V. Vučković, "Opšta teorija električnih mašina", Nauka Beograd, 1997.
- [7] G. Joksimović, "Analiza i simulacija kvarova kod kaveznog indukcionog motora modelom mnogostrukog spregnutih kola", doktorska disertacija, Podgorica 1999.
- [8] M. Jandrić, T. Busti, S. Štefanko, "Uticaj dinamike na moment pri zaletu kaveznih asinhronih motora većih snaga", JUKO CIGRE XV savetovanje Elektroenergetičara Jugoslavije Beograd 1981.
- [9] Lj. Stanković, "Time-frequency signal analysis", monografija, Podgorica 1999.

MEASUREMENT OF DINAMIC ELECTROMAGNETIC TORQUE DURING START-UP OF HV INDUCTION MOTOR