



UDK: 631.372

MERENJE MOMENTA ASINHRONOG MOTORA

Dukan Vukić, Đuro Ercegović, Dragiša Raičević, Mićo Oljača
Poljoprivredni fakultet - Beograd

Sadržaj: U radu je prikazan pregled metoda za merenje momenta asinhronog elektromotora. Obrađene su klasične metode opterećenja i savremene metode koje su se razvile zahvaljujući veoma intenzivnom razvoju energetske elektronike, mikrokompjuterskih sistema i raznih vrsta senzora i pretvarača. Primenom savremenih metoda merenja momenta moguće je pored statičke dobiti i dinamičku karakteristiku momenta asinhronih motora i niz drugih podataka značajnih za eksploataciju i optimizaciju električnog pogona.

Ključne reči: *moment, asinhroni motor, kočnica, torziona naprezanje, termoelement.*

1. UVOD

Asinhroni elektromotor predstavlja danas najvažniji uređaj za izvršenje mehaničkog rada. Nalazi vrlo veliku primenu u svim oblastima industrije i tehnike, uključujući i oblast poljoprivrede. Radne mašine u poljoprivredi koje za pogon koriste elektromotore najčešće zahtevaju motor snage do 10 kW, približno konstantne brzine obrtanja, bez potrebe regulisanja brzine, jednostavan za korišćenje i održavanje, brzo spreman za rad uz puno opterećenje, otporan prema grubim manipulacijama, dobrih ekonomskih karakteristika i sa mogućnošću jednostavnog priključenja na postojeću mrežu. Sve te zahteve, od svih vrsta elektromotora, ubedljivo najbolje i u potpunosti ispunjava asinhroni motor sa kaveznom rotorom, koji se često zove asinhroni kavezni motor [1].

Jedan od najvažnijih postupaka prilikom ispitivanja električnih pogona sa asinhronim motorom jeste merenje momenta i snimanje karakteristike momenta asinhronog motora u celom intervalu promene brzine. Merenje momenta asinhronog motora moguće je sprovesti primenom različitih metoda. Klasične metode, koje su dugo bile dominantne, su tzv. metode opterećenja uz primenu neke od kočnica (mehaničke, hidraulične, magnetne, električne) ili uz primenu elektrodinamometra (dinamo vaga), specijalne električne mašine konstruisane za tu svrhu. Zahvaljujući intenzivnom razvoju energetske elektronike, mikrokompjuterskih sistema i tehnike senzora i pretvarača u

poslednje dve decenije, razvijene su savremene metode merenja momenta. Ove metode omogućavaju dobijanje statičkih i dinamičkih karakteristika momenta i niz drugih podataka značajnih za efikasnu eksploataciju, održavanje i optimizaciju datog električnog pogona.

2. METODE OPTEREĆENJA MERENJA MOMENTA ASINHRONOG MOTORA

Metode opterećenja merenja momenta asinhronog elektromotora zasnivaju se na tome da se osovina motora optereti kočnicom čiji je moment poznat ili se može odrediti. Menjajući opterećenje dobija se niz tačaka koje definišu deo ili neku karakteristiku momenta (mehaničku karakteristiku) ispitivanog motora. Kočnice za opterećivanje ispitivanog motora mogu biti i mehaničke, hidraulične, magnetne i električne

2.1. Mehaničke kočnice

Mehaničke kočnice rade tako što se trenjem stvaraju otpori kretanju motora, apsorbuju mehaničku energiju i pretvaraju je u toplotu. Izvedena rešenja mehaničkih kočnica su Pronijeva kočnica, Braureva kočnica, pojasna kočnica, Karpantijeva kočnica i užna kočnica. U zavisnosti od vrste kočnice merenje momenta se vrši pomoću poluga ili traka sa tegovima ili sa torzionom oprugom sa kazaljkom. Ove kočnice se koriste za ispitivanje motora malih snaga. Detaljan opis i karakteristike tih kočnica dat je u radovima [2] i [3].

2.2. Hidraulične kočnice

Princip rada hidraulične kočnice zasniva se na korišćenju sile trenja obrtnog tela u tečnosti pri čemu se i ovde mehanička energija motora koji se ispituje pretvara u toplotu. Na osovini kočnice pričvršćene su lopatice koje se obrću između statorskih lopatica ili rebara kućišta u kome se nalazi voda. Voda struji i teži da povuče kućište sa sobom što se sprečava tegom na kraju poluge kojom se meri moment. Snaga opterećenja se reguliše promenom količine vode u kućištu, promenom protoka i priključenjem većeg broja kočnica na red. Nije moguća fina regulacija. Moment opterećenja hidraulične kočnice srazmeran je drugom a snaga trećem stepenu brzine obrtanja.

2.3. Magnetne kočnice

Magnetne kočnice se koriste za merenje momenta motora malih snaga i velikih brzina obrtanja i rade na osnovu gubitaka u gvožđu usled histerezisa ili usled vihornih struja [4]. Njihova konstrukcija je slična generatoru jednosmerne struje bez namotaja na rotoru koji je izrađen od gvožđa, koje ima velike gubitke ili usled histerezisa ili usled vihornih struja. Kod ovih kočnica predviđeno je merenje momenta na statoru. slično kao kod prethodnih kočnica, preko poluge i tegova ili torziona opruge sa kazaljkom. Savremene magnetne kočnice imaju ugrađen uređaj za merenje brzine obrtanja, impulsivnog tipa sa digitalnim pokazivanjem [2].

2.4. Električne kočnice

Kao električne kočnice za određivanje momenta ili karakteristike momenta asinhronog motora koriste se najčešće generatori jednosmerne struje sa paralelnom pobudom, sinhroni generatori ili specijalno konstruisana mašina za tu svrhu koja se naziva elektrodinamometar [2]. Za standardne električne generatore koji se koriste kao kočnice neophodno je poznavati ili prethodno odrediti njihovu karakteristiku stepena korisnog dejstva za jednu određenu brzinu ili niz karakteristika za brzine koje su karakteristične za ispitivani motor. Merenjem električne snage generatora, uz poznatu karakteristiku stepena korisnog dejstva i brzine određuje se moment motora. Ove električne kočnice se odlikuju stalnošću rada pri kočenju i lakom i finom regulacijom opterećenja.

Posebna vrsta električne kočnice je elektrodinamometar. To je specijalna mašina konstruisana za merenje momenta električnih motora i električnih generatora, što znači da može da funkcioniše i kao radna mašina (kočnica) i kao pogonska mašina (motor). Elektrodinamometar ujedinjuje u sebi sve dobre osobine električnih i mehaničkih kočnica. Detaljan opis konstrukcije i principa rada elektrodinamometra dat je u [2].

3. MERENJE MOMENTA MERENJEM DEFORMACIJA IZAZVANIH TORZIONIM NAPREZANJEM

U savremenim elektromotornim pogonima sa asinhronim motorom, motor radi u promenljivim režimima rada sa čestim uključivanjem, zaletanjem, kočenjem i dr. Kod nekih asinhronih motora ta prelazna stanja relativno dugo traju i zato zaslužuju i posebnu pažnju. Da bi se vršila analiza tih polaznih stanja neophodno je određivanje dinamičke karakteristike momenta asinhronih motora kada je moment funkcija ubrzanja.

Snimanje dinamičke karakteristike momenta najčešće se vrši pomoću merne osovine koja se postavlja između motora i radne mašine i pomoću specijalne radijalno-zupčaste spojnice, spaja se sa ispitivanim motorom i radnom mašinom. U posebnom otvoru na mernoj osovini postavlja se pretvarač torzionog momenta koji proizvodi električni signal koji se odvodi u pojačavač. Iz pojačivača se dobija jednosmerni signal proporcionalan momentu koji se dalje vodi na pisač, osciloskop ili računar.

Mehanički sistem koga čine asinhroni motor i radna mašina, spojeni preko elastične veze može se opisati pomoću sledećih jednačina [3]:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_M - C(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (1)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = C(\alpha_1 - \alpha_2) - M_{RM} \quad (2)$$

$$M_t = C(\alpha_1 - \alpha_2)$$

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1 \quad \frac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2 \quad (3)$$

gde su: J_1 - moment inercije motora i spojnice, J_2 - moment radne mašine i spojnice, M_M - moment motora, M_{RM} - moment inercije radne mašine, M_t - moment torzije vratila, C - koeficijent torzije vratila, α_1 i α_2 - uglovi na jednom i drugom kraju vratila, ω_1 i ω_2 - ugaone brzine na jednom i drugom kraju vratila

Rešavanjem prethodnih jednačina dolazi se do jednačine koja daje vezu između momenta koji razvija asinhroni motor i momenta koji meri merna osovina:

$$M = \frac{J_1}{C} \frac{d^2 M_t}{dt^2} + \frac{J_1 + J_2}{J_2} M_t - \frac{J_1}{J_2} M_{RM} \quad (4)$$

Za stacionarni režim se na osnovu jednačina (1) i (2) dobija da je:

$$M = M_t = C (\alpha_1 - \alpha_2) = M_{RM} \quad (5)$$

Dakle, merenje momenta motora svodi se na merenje torzionog momenta vratila (naprezanja) odnosno na registrovanje razlike uglova između dodatne obrtne mase (radne mašine) i ispitivanog motora.

Za merenje torzionog naprezanja primenjuju se tenzioelementi koji se postavljaju u pravcu najvećeg naprezanja tj. pod uglom od 45° u odnosu na osu osovine.

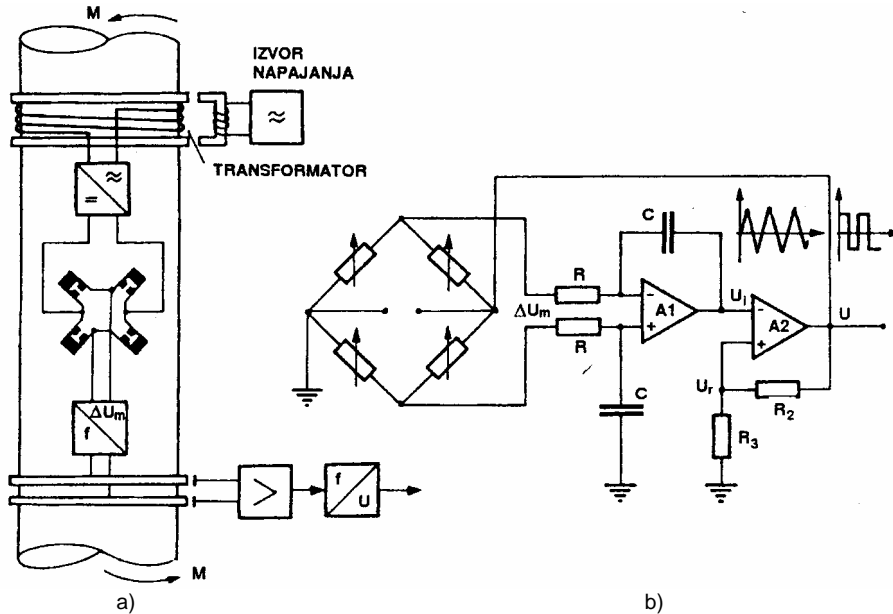
Potrebna su četiri tenzioelementa za formiranje punog mosta. Na taj način se postiže najveća osetljivost i najbolja temperaturna kompenzacija [5]. Osnovni problem koji se pri tome javlja jeste realizacija spoja mernog mosta i mernog uređaja. Klasično rešenje je pomoću kontaktnih prstenova. Prelazni otpor kontakata i termoelektromotorna sila, koja nastaje zbog zagrevanja kontakata smanjuje tačnost tenziometra. Ovi problemi uspešno se rešavaju primenom beskontaktnih senzora [6].

I beskontaktni senzori grade se na principu merenja torzionog naprezanja. Principijelna šema tog merenja data je na sl. 1a. Beskontaktno napajanje mosta vrši se pomoću induktivnog pretvarača u obliku obrtnog transformatora. Sekundar transformatora spojen je na most preko ispravljača. U mernoj dijagonali mosta koja je priključena na pretvarač napona i frekvencije dobija se jednosmerni napon ΔU_m koji je proporcionalan merenom momentu. Pretvarač napona i frekvencije (U/f - pretvarač) napravljen je na bazi integratora u diferencijalnom spoju i komparatora i njihova šema prikazana je na sl. 1b.

Na izlazu iz komparatora generiše se napon pravougaonog oblika čija je frekvencija srazmerna mernom momentu. Frekventna demodulacija se vrši pomoću f/U pretvarača koji se obično pravi kao generator impulsa konstantne širine kojem se u seriji dodaje niskopropusni filter.

Beskontaktni senzor momenta na bazi tenzootporničkih elemenata primenjuje se za merenje momenta u opsegu 10 Nm do 50 kNm. U kombinaciji se senzorom ugaone brzine može ostvariti višefunkcionalni merni uređaj koji na svom izlazu daje informaciju o broju obrtaja, momenta i snage [6].

Posebna vrsta senzora momenta su digitalni senzori momenta čiji se princip rada takođe zasniva na proporcionalnosti torzionog ugla sa momentom [6]. Tačnost ovih senzora je $\pm 0,1\%$ pri intervalu promene broja obrtaja 0-120 000 o/min. Signal može biti i analogni (naponski ili strujni).



Sl. 1. Beskontaktni senzor momenta sa tenzioelementima:
a) principijelna šema, b) pretvarač napona i frekvencije

4. MERENJE MOMENTA MERENJEM BRZINE

Merenje momenta merenjem broja obrtaja asinhronog motora vrši se tako što se pri zaletanju ispitivanog motora snima karakteristika brzine u funkciji vremena. Diferenciranjem te karakteristike $n = f(t)$ i znajući momente inercije obrtnih masa određuje se karakteristika momenta datog asinhronog motora [6].

Karakteristika brzine $n = f(t)$ dobija se pomoću tahometarskog generatora jednosmerne struje. To je generator jednosmerne struje sa permanentnim magnetima koji daje proporcionalnu zavisnost napona U i broja obrtaja n .

Za određivanje momenta na osnovu karakteristike brzine postoji više metoda od kojih su najvažnije:

- a) grafička metoda,
- b) metoda diferenciranjem pomoću kondenzatora,
- c) metoda diferenciranjem pomoću prigušnice,
- d) metoda diferenciranja pomoću dva tahometra.

Detaljan prikaz tih metoda dat je u [3].

5. MERENJE MOMENTA BROJANJEM OBRTAJA I DVOSTRUKIM DIFERENCIRANJEM

Merenje momenta pomoću ove metode vrši se tako što se na osovinu ispitivanog asinhronog motora postavi zupčanik od mekog feromagnetnog materijala. Pri obrtanju svaki zub na zupčaniku indukuje jedan strujni impuls pri čemu svaki impuls označava

zaokret osovine za određen deo punog kruga. Impuls se dovede u računar koji u određenim razmacima vremena pravi razliku Δa za vremenski interval Δt dobija se da je

$$n = \frac{da}{dt} \quad (6)$$

Ako se isti postupak primeni za dobijene vrednosti n dobija se da je:

$$M = k \frac{dn}{dt} \quad (7)$$

Pored navedenog načina primenjuje se i konstrukcija sa rotirajućom pločom koja na sebi nosi prsten sa više naizmenično utisnutih svetlih i tamnih delova koji se zatim fotoelektričnim putem analiziraju [7].

6. MERENJE MOMENTA SNIMANJEM LINIJSKIH NAPONA I STRUJA

Zahvaljujući pojavi moćne računarske tehnike u ispitivanju i kontroli električnih mašina izražena je tendencija eliminacije konvencionalnih senzora. Umesto njih, razvijaju se metode koje se zasnivaju na primeni složenih numeričkih metoda [8].

Jedna od takvih metoda jeste i metoda merenja elektromagnetnog momenta asinhronog motora snimanjem linijskih napona i struja [9]. Pri tome je potrebno poznavati vrednost otpora po fazi namotaja statora, bez potrebe da se brzina snima tokom zaletanja.

Polazeći od izraza za elektromagnetni moment asinhronog motora [8]

$$M_{em} = p \left(\overline{\psi}_s \times \vec{i}_s \right) \quad (8)$$

gde je $\overline{\psi}_s$ - fazor flukseva obuhvatanja statora; \vec{i}_s - fazor struja faznih namotaja statora i p - broj pari polova, dolazi se do sledećeg izraza za elektromagnetni moment asinhronog motora, pri sprezi namota statora u zvezdu [9]

$$M = \frac{p}{\sqrt{3}} \left[(i_b \int U_{ab} + 2U_{bc} + 3Ri_c) dt - i_c \int (U_{ab} - U_{bc} + 3Ri_b) dt \right] \quad (9)$$

gde su U_{ab} i U_{bc} - linijski naponi, i_b i i_c - struje odgovarajućih faza i R - otpornost po fazi statora.

Sličan izraz je i za spregu trougao. Razlika je jedino u tome što se kroz spregu zvezde pod integralom javlja član $3R$ a kod spregu trougao R .

Primenom metoda numeričke integracije iz izraza [9] se, na osnovu poznavanja samo dva linijska napona, i dve linijske struje i otpora po fazi namotaja statora, dobija elektromagnetni moment asinhronog motora.

Iako se ovde radi o određivanju elektromagnetnog momenta a ne mehaničkog momenta (na osovini) podaci koji se tom prilikom dobijaju mogu se korisno upotrebiti za monitoring asinhronog motora kao i za utvrđivanje kvara namotaja statora ili rotora. Na osnovu snimanja samo linijskih napona i struja moguće je odrediti i moment inercije rotora asinhronog motora [9].

ZAKLJUČAK

Merenje momenta asinhronog motora predstavlja važan postupak u ispitivanju električnih pogona sa ovom vrstom motora. Klasične metode koje se u tom smislu primenjuju su metode opterećenja uz primenu mehaničkih, hidrauličnih, magnetnih i električnih kočnica. Primenom ovih metoda moguće je merenje momenta za određenu brzinu i dobijanje statičke karakteristike momenta. Savremene metode merenja momenta razvile su se zahvaljujući razvoju energetske elektronike, mikrokompjuterskih sistema, senzora i primenom novih metoda matematičkog modelovanja asinhronog motora. Primenom tih metoda moguće je dobijanje karakteristike momenta asinhronog motora i u prelaznim režimima rada koje karakteriše veliki broj zaletanja i kočenja, promena režima rada i zaustavljanja. Dobijeni podaci omogućavaju i detekciju kvarova i oštećenja izolacije motora.

LITERATURA

- [1] Vukić Đ.: Asinhroni kavezni motor - elektromotor za poljoprivredu", Poljotehnika br. 1, str. 46-48, Beograd, 1994.
- [2] Petrović M.: Ispitivanje električnih mašina, Naučna knjiga, Beograd, 1997.
- [3] Vukić Đ.: Ispitivanje električnih mašina, Elektrotehnički fakultet, Priština, 1986.
- [4] Vukić Đ., Stajić Z., Radić P.: Asinhrona mašine, Akademska misao, Beograd, 2004.
- [5] Stanković D.: Fizičko-tehnička merenja, Univerzitet u Beogradu, 1997.
- [6] Popović M.: Senzori i merenja, Viša elektrotehnička škola, Beograd, 2000.
- [7] Woodson H., Melcher J.: Electromechanical dynamics, John Wiley, New York, 1969.
- [8] Vučković V.: Opšta teorija električnih mašina, Nauka, Beograd, 1998.
- [9] Joksimović G., Penman J., Đurović M.: The New Method for Determination of Induction Machine Rotor Inertia, IEEE Power Engineering Review Letters, March, 1999.
- [10] Vukić Đ.: Osnovi elektrotehnike i električnih merenja, Poljoprivredni fakultet, Beograd, 2004.
- [11] Vukić Đ.: Karakteristika momenta asinhronog motora sa dvostrukim napajanjem, Publikacije Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, serija Elektroenergetika, br. 149, str. 15-24, Beograd, 1990.
- [12] Жерве Г.Н.: Промышленные испытание электрических машин, Энергоатомиздат, Ленинград, 1984.

INDUCTION MOTOR TORQUE MEASUREMENT

Dukan Vukić, Đuro Ercegović, Dragiša Raičević, Mićo Oljača
Faculty of Agriculture - Belgrade

Abstract: Review of methods for induction electrical motor torque measurement is presented in this paper. Standard load methods were treated, also as modern methods that accomplished owing to the very intensive development of power electronics, microcontroller systems and various types of sensors and transducers. Appliance of novel torque measurement methods enabled, by the static characteristic, also obtainment of dynamic torque-speed characteristic of induction motors, also as plenty of other data important for service and optimization of analysed electric drive.

Key words: torque, induction motor, brake, torsional tension, thermoelectric cell.