

Nikola Koljčević
nkoljcevic@gmail.com

Martin Čalasan
Elektrotehnički fakultet, UCG
martinc@ac.me

Izlazne karakteristike asinhronne mašine pri različitim frekvencijama

KRATAK SADRŽAJ: Ovaj rad se bavi motornim režimom rada asinhronne mašine. U radu je prikazan klasični postupak određivanja parametara koji je primijenjen na asinhronoj mašini. Na bazi određenih parametara izvršeno je određivanje izlaznih ($P-\omega$, $Q-\omega$, $I-\omega$) karakteristika asinhronne mašine. Dobijene karakteristike su upoređene sa eksperimentalno dobijenim rezultatima pri različitim frekvencijama. Pokazano je da pri nominalnoj frekvenciji i opsegu frekvencija koje su blizu nominalne imamo dobro poklapanje eksperimentalnih i simulacionih izlaznih karakteristika asinhronne mašine, dok pri nizim frekvencijama nemamo poklapanja simulacionih izlaznih karakteristika asinhronne mašine.

Ključne riječi: asinhrona mašina, određivanje parametara, izlazne karakteristike.

Output characteristics of the induction machine at different frequencies

Summary: This paper deals with the induction machine output characteristics determination at different voltage supply frequencies. To this end, in this paper a classic procedure for determination of induction machine equivalent circuit parameters is presented ($f = 50$ Hz). For concrete machine, on the basis of obtained parameters, the determination of the output characteristics (active power P - speed ω , reactive power Q - speed ω , current I - speed ω) was performed. The obtained characteristics are compared with the experimentally obtained results at different frequencies. It has been shown that at a nominal frequency, and in the range of frequencies close to the nominal, we have a good matching between the experimental and simulation output characteristics of the induction machine. However, this conclusion is not valid for low frequency range.

Keywords: Induction machine, parameters estimation, output characteristics

1. Uvod

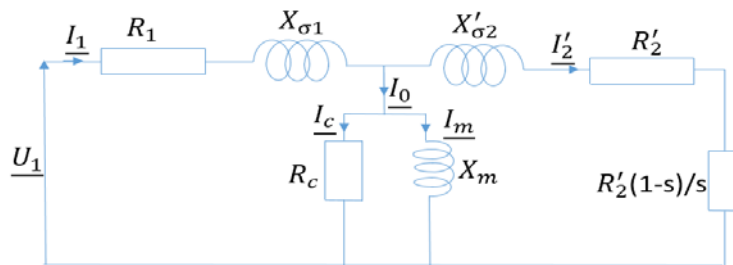
Asinhrona mašina je najčešće korišćena električna mašina u praksi [1-3]. Riječ je o električnoj mašini naizmjenične struje koja se može naći u ulozi motora, generatora ili u ulozi elektrodinamičke kočnice. Ipak, ona se najčešće koristi kao motor - kako trofazni tako i monofazni. Asinhrona ili indukciona mašina je jedna od najzastupljenijih mašina u pogonima [4]. Kod asinhronih mašina, brzina obrtaja rotora i brzina obrtaja obrtnog magnetnog polja nisu sinhronizovane. Prednosti asinhronne mašine u odnosu na ostale vrste mašina su: niža cijena, jednostavnost konstrukcije, manji moment inercije, robusnost, pouzdanost, sigurnost u radu i lako održavanje. Značajna upotreba asinhronih mašina posebno je aktivirana razvojem energetske elektronike i upotrebom invertora za upravljanje asinhronom mašinom. Iako je upotreba invertora omogućila primjenu asinhronne mašine u brojnim pogonima, ipak je sa upotrebom invertora došlo i do pojave brojnih neželjenih efekata koji se manifestuju kod ove mašine – zujanje, buka, vibracije, povećano grijanje [1]. Ovaj rad se bavi određivanjem izlaznih karakteristika asinhronne mašine pri frekventnom upravljanju. Cilj je da se ukaže na razliku izlaznih karakteristika asinhronne mašine pri napajanju iz invertora kao i pri napajanju iz mreže i uz istu frekvenciju.

2. Princip rada i zamjenska šema [1, 5]

Kada se na namotaje statora trofaznog asinhronog motora dovede trofazni napon, u namotajima statora proteknu struje koje stvaraju obrtno magnetno polje koje rotira sinhronom brzinom.

$$n = \frac{60f}{p}. \quad (1)$$

Da bi analizirali rad asinhronne mašine u ustaljenom stanju potrebno je poći od zamjenske šeme asinhronne mašine prikazane na slici 1. Oznake R_1 i X_1 predstavljaju otpornost i reaktansu statora, R_2' i X_2' predstavljaju otpornost i reaktansu rotora, dok R_c i X_m predstavljaju otpornost i reaktansu grane magnećenja.



Slika 1. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora svedeno na primarnu stranu sa razloženom otpornošću u kolu rotora

Za određivanje parametara mašine koriste se dva oglada - ogled praznog hoda i ogled kratkog spoja. Međutim, prvi korak u određivanju parametara mašine jeste mjerenje otpornosti namotaja statora - pomoću unimjera ili UI metodom. Iz oglada kratkog spoja određuje se impedansa redne grane po fazi:

$$Z_{ks} = \frac{U_{ks}}{I_{ks}}. \quad (2)$$

Aktivna otpornost redne grane se određuje iz podataka o sanazi u ogledu kratkog spoja,

$$R_{ks} = R_1 + R_2 = \frac{P_{ks \text{ fazno}}}{I_{ks}^2}. \quad (3)$$

Iz impedanse i aktivne otpornosti redne grane određuje se i reaktansa kratkog spoja,

$$X_{ks} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2} = \sqrt{Z_{ks}^2 - R_{ks}^2}, \quad (4)$$

pa je, uz ustaljenu pretpostavku o ravnopravnom učešću rasipnih reaktansi i reaktansi kratkog spoja,

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2} = 0.5X_{ks}. \quad (5)$$

Iz oglada praznog hoda određuju se parametri otočne grane,

$$R_m = \frac{E_1^2}{P_o \text{ fazno}}, \quad (6)$$

$$X_m = \frac{E_1}{I_m}, \quad (7)$$

pri čemu je E_1 indukovana elektromotorna sila, koja je približno jednaka ulaznom naponu, a I_m struja kroz kalem. Ekvivalentiranjem zamjenske šeme dobija se impedansa motora sa kojom računamo struju, aktivnu i reaktivnu snagu.

$$Z_{ek} = \frac{R_2'}{s} + jX_2, \quad (8)$$

$$Z_{ek1} = \frac{R_c jX_m}{R_c + jX_m}, \quad (9)$$

$$Z_{ek2} = \frac{Z_{ek1}Z_{ek}}{Z_{ek1}+Z_{ek}}, \quad (10)$$

$$Z_{ek_rez} = R_1 + jX_1 + Z_{ek2}. \quad (11)$$

Fazna struja motora na osnovu faznog napona jednaka je:

$$I_1 = \frac{U_f}{|Z_{ek_rez}|}. \quad (12)$$

Da bi izračunali aktivnu i reaktivnu snagu potreban nam je faktor snage koji računamo na sledeći način:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\operatorname{Re}(Z_{ek_rez})}{\operatorname{Im}(Z_{ek_rez})} \right) \quad (13)$$

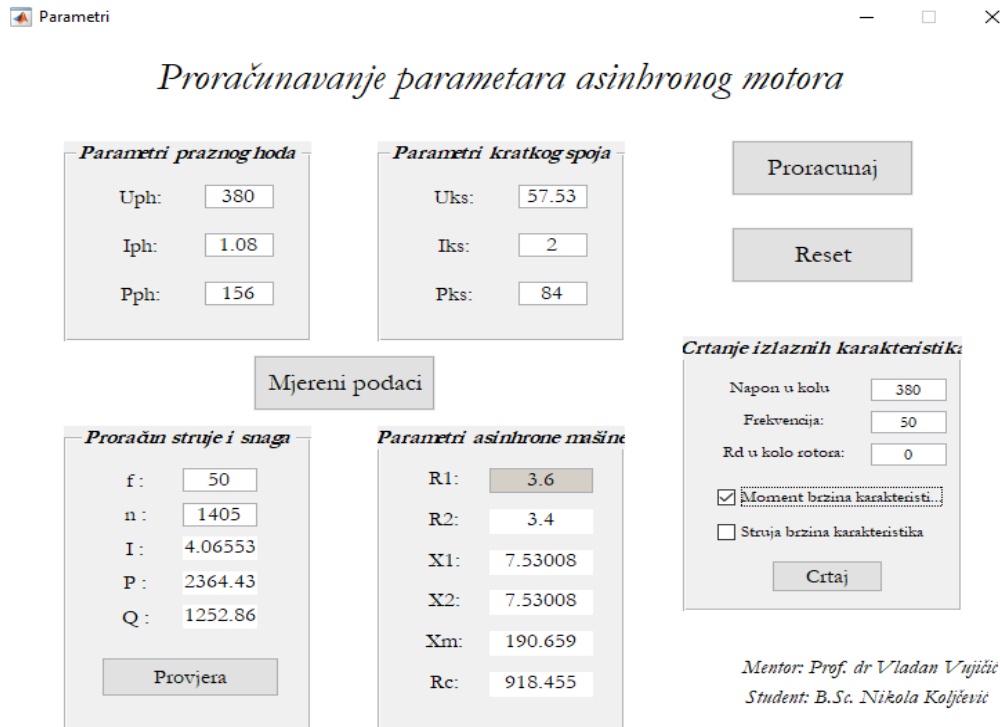
Pa je izraz za aktivnu i reaktivnu snagu:

$$P = \sqrt{3}UI \cos(\varphi) \quad (14)$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin(\varphi) \quad (15)$$

3. GUI aplikacija za određivanje izlaznih karakteristika asinhronne mašine

Za proračun parametara i crtanje izlaznih karakteristika asinhronne mašine formirana je Matlab-GUI aplikacija prikazana na slici 2.



Slika 2 GUI aplikacija za proračun parametara mašine

Realizovana aplikacija, na bazi mjerenih vrijednosti iz ogleđa praznog hoda i kratkog spoja potrebnih za određivanje parametara motora, shodno matematičkim relacijama datim u prethodnom poglavlju određuju vrijednosti parametara zamjenske šeme date slikom 1. Takođe, ova aplikacija ima mogućnost određivanja vrijednosti aktivne, reaktivne snage, fazne struje za unaprijed zadatu brzinu u interfejsu.

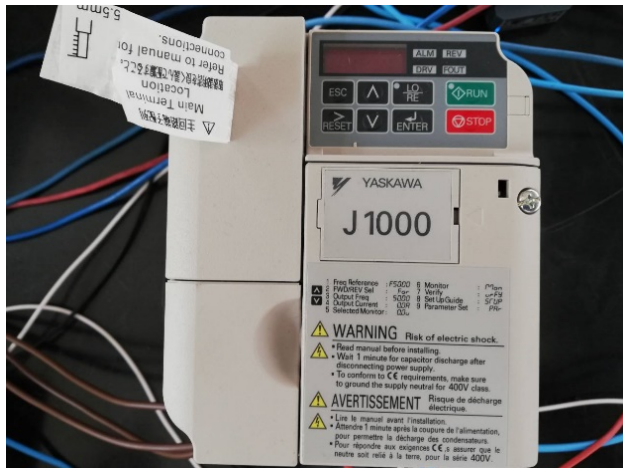
4. Eksperimentalni rezultati

U cilju eksperimentalne verifikacije uticaja frekvencije na izlazne karakteristike asinhronne mašine sprovedeno je eksperimentalno ispitivanje asinhronne mašine 4kW, 380V, 50Hz u Laboratoriji za električne mašine na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Izgled asinhronne mašine koja je osovinom povezana sa mašinom jednosmjerne struje prikazana je na slici 3.



Slika 3. Asinhroni motor spojen osovinom sa motorom jednosmjerne struje

Napajanje asinhronne mašine je ostvareno preko invertora Yaskawa J1000 (slika 4), kontrolisanog preko PLC-a Unitronics Jazz (slika 5).



Slika 4. Invertor



Slika 5. PLC Unitronics

Izgled kompletnog laboratorijskog stola je prikazan na slici 6.



Slika 6. Laboratorijski sto

Ekperimentalno testiranje je sprovedeno u dvije etape.

- ✓ U prvoj etapi, izvedeni su oglеди praznog hoda i kratkog spoja, u cilju određivanja parametara asinhronne mašine.

Iz oglēda kratkog spoja dobijeni rezultati su:

$$U_{ks} = 57.53 \text{ V}$$

$$I_{ks} = 2 \text{ A}$$

$$P_{ks} = 84 \text{ W}$$

Primjenjujući formule navedene u poglavlju 2 dobija se da je:

$$R_2 = 3.4 \ \Omega \quad X_1 = 7.53 \ \Omega \quad X_2 = 7.53 \ \Omega$$

Dok su iz oglēda praznog spoja dobijeni rezultati :

$$U_{ph} = 380 \text{ V}$$

$$I_{ph} = 1.08 \text{ A}$$

$$P_{ph} = 156 \text{ W}$$

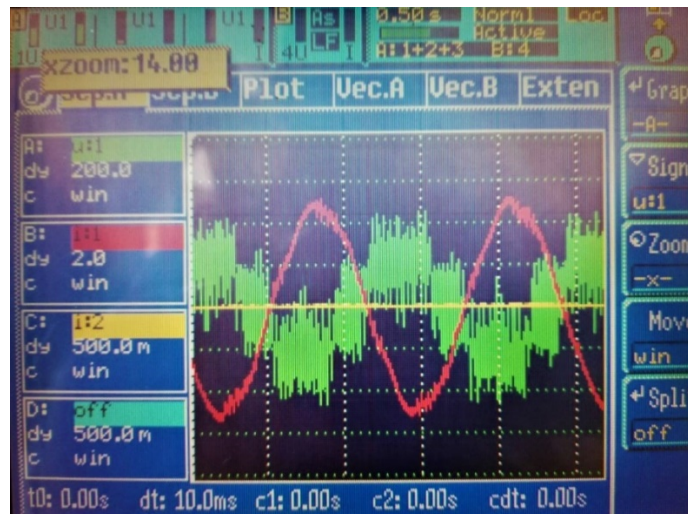
Takodje primjenjujući formule iz poglavlja 2 za određivanje parametara otočne grane dobija se:

$$R_c = 918.45 \Omega \quad X_1 = 195.65 \Omega$$

- ✓ U drugoj etapi vršili smo opterećivanje asinhronog motora na taj način što smo podešavali vrijednost struje generatora. U tim eksperimentima vršeno je mjerenje brzine, struje, aktivne i reaktivne snage asinhronog motora, za različite vrijednosti frekvencije napona napajanja. U svim eksperimentima, efektivna vrijednost faznog napona motora je bila ista i jednaka nominalnoj vrijednosti.

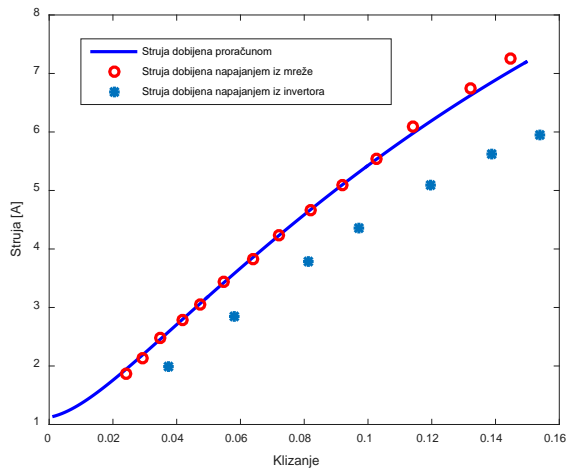
5. Izlazne karakteristike asinhronog motora

Prije napajanja asinhronne mašine iz invertora, u cilju testiranja, određene su izlazne karakteristike (struja-klizanje, aktivna snaga-klizanje, reaktivna snaga-klizanje) asinhronne mašine kada se napaja iz mreže (50Hz). Nakon toga, na bazi proračunatih parametara određene su i estimirane vrijednosti istih karakteristika. Zatim, izvršeno je napajanje asinhronne mašine iz invertora, pri čemu je podešena vrijednost frekvencije napona napajanja 50Hz, i efektivna vrijednost faznog napona od 220V. Tokom ovog eksperimenta posmatrani su talasni oblici napona motora i struje motora (slika 7.). Sa ove slike se vidi da i struja i napon motora u ovom slučaju imaju veliki sadržaj viših harmonika.

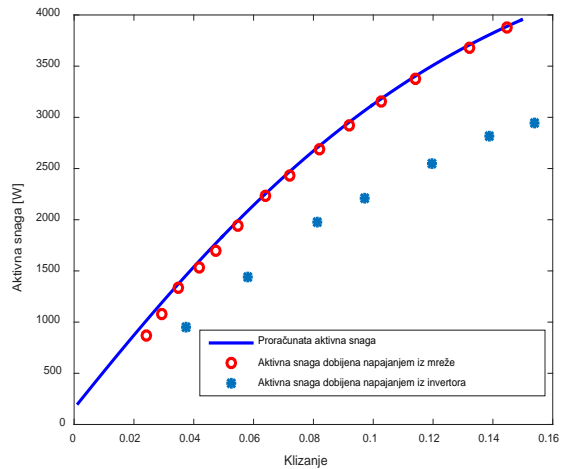


Slika 7. Oblik napona i struje za frekventno napajanje pri 50 Hz

Zavisnosti struja-klizanje, aktivna snaga-klizanje i reaktivna snaga-klizanje posmatrane asinhronne mašine, određene mjerenjem pri napajanju iz mreže, pri napajanju iz invertora i dobijene preko proračuna prikazane su na slikama 8-10.

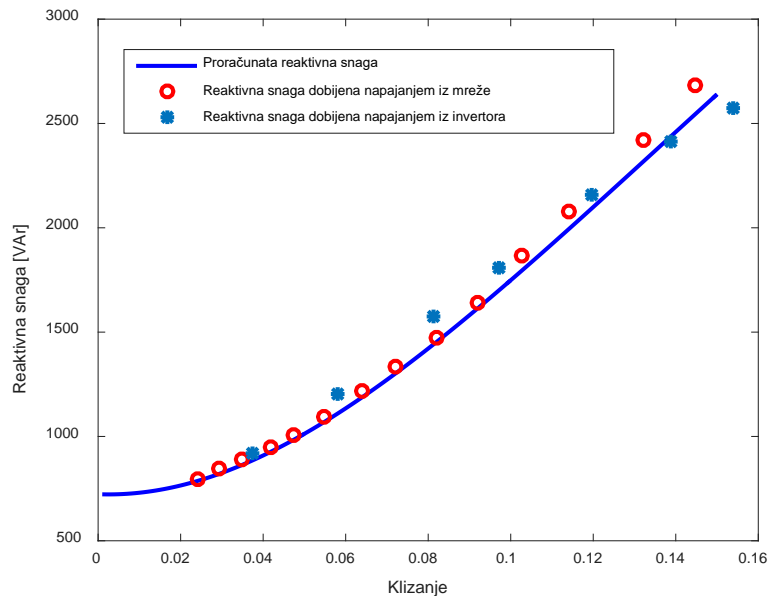


Slika 8. Struja – kliranje karakteristike (50Hz)



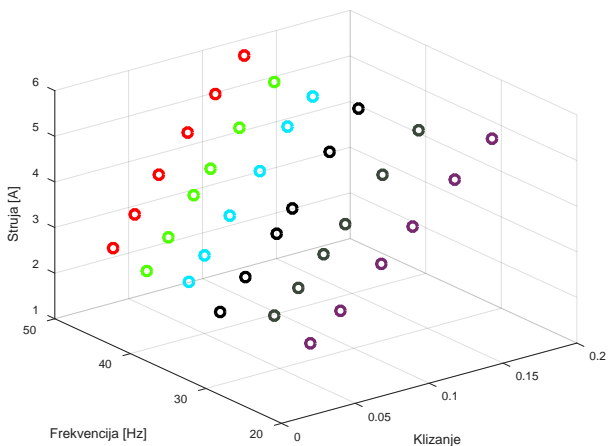
Slika 9. Aktivna snaga – kliranje karakteristike (50Hz)

Jasno je da su parametri određeni preko oglada praznog hoda i kratkog spoja omogućavaju formiranje izlaznih karakteristika koje se odlično poklapaju sa karakteristikama koje se dobijaju u slučaju kada se mašina napaja iz mreže. Međutim, u slučaju napajanja mašine iz invertora postoji velika razlika kod izlaznih karakteristika. Razlog za to leži u velikoj koncentraciji viših harmonika u talasnom obliku i napona i struje.

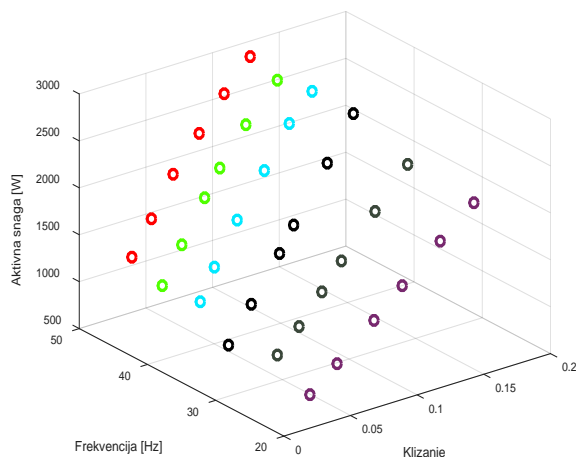


Slika 10. Reaktivna snaga – kliranje karakteristike (50Hz)

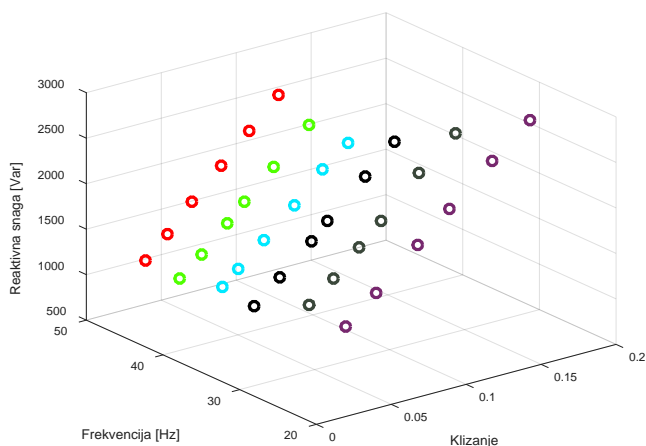
U cilju daljeg ispitivanja karakteristika asinhronne mašine napajane iz invertora, sprovedeno je i ispitivanje uticaja frekvencije napona napajanja na izlazne karakteristike mašine, u slučaju jednake efektivne vrijednosti faznog napona. Rezultati ovih ispitivanja, u 3-D prikazu, dati su na slikama 11-13.



Slika 11. Struja – frekvencija napona napajanja – kliranje karakteristike



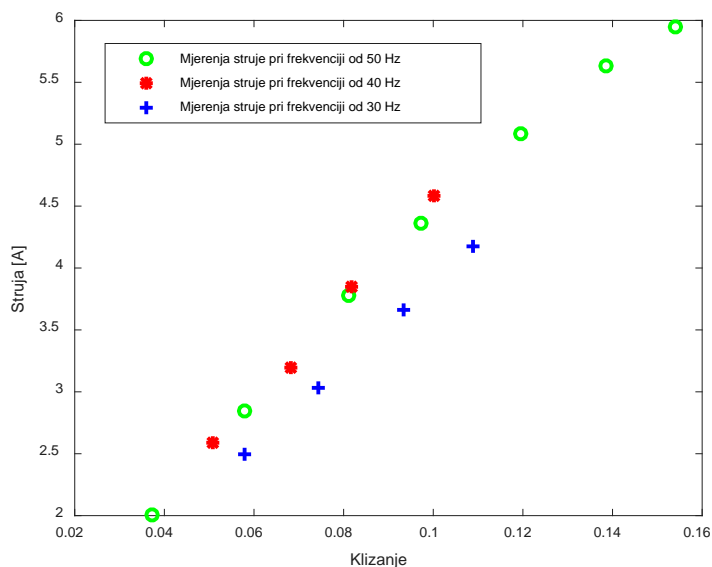
Slika 12. Aktivna snaga – frekvencija napona napajanja – kliranje karakteristike



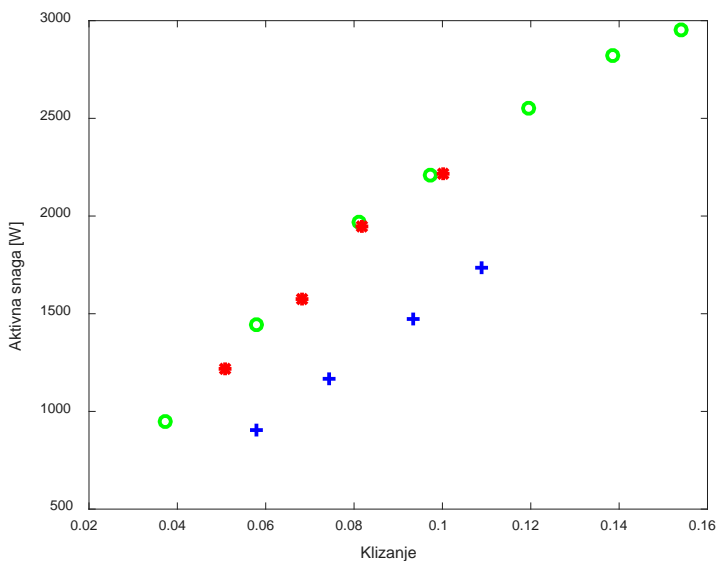
Slika 13. Rektivna snaga – frekvencija napona napajanja – kliranje karakteristike

2-D prikaz zavisnosti struja - kliranje karakteristike, 50Hz, 40Hz i 30Hz vrijednosti frekvencije, prikazane su na slikama 14-16. Na osnovu slika 11-16 jasno je da za veće vrijednosti frekvencije napona napajanja (u konkretnom slučaju za frekvencije 40Hz, 45Hz i 50Hz) dobijaju se približno iste vrijednosti struje i aktivne snage. Razlog za to leži u činjenici da male promjene vrijednosti frekvencije ne utiču na parametre mašine

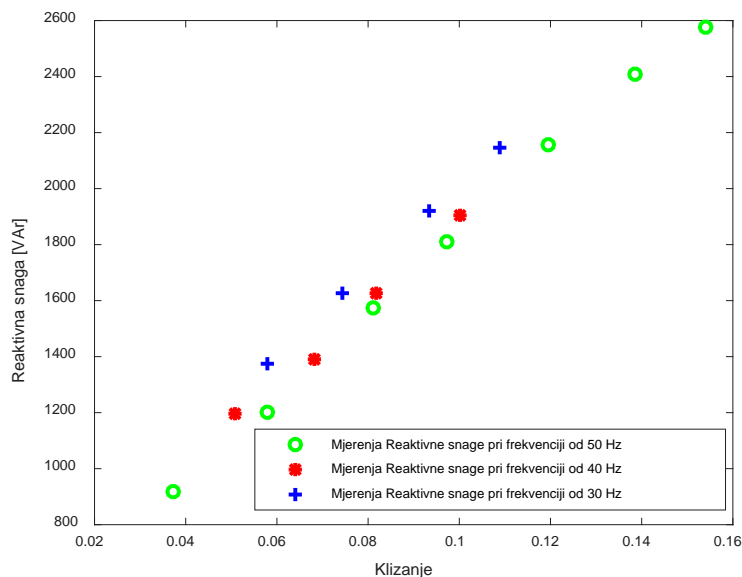
(isti efekat na magnetski material i provodnika). Ovo je jasno i zbog činjenice da u radovima koji se bave estimacijom parametara asinhronne mašine se smatra da male promjene frekvencije ne utiču na vrijednosti parametara mašine.



Slika 14. Struja –klizanje karakteristike za različite vrijednosti frekvencije napona napajanja



Slika 15. Aktivna snaga –klizanje karakteristike za različite vrijednosti frekvencije napona napajanja



Slika 16. Reaktivna snaga –klizanje karakteristike za različite vrijednosti frekvencije napona napajanja

6. Zaključak

Ovaj rad je posvećen eksperimentalnom ispitivanju uticaja frekvencije na struja-klizanje, aktivna snaga-klizanje i reaktivna snaga-klizanje karakteristike asinhronne mašine. Pokazano je da vrijednost snage koja se dobija pri napajanju asinhronne mašine iz mreže značajno odstupa od vrijednosti snage asinhronne mašine koja se dobija kada se ista napaja iz invertora frekvencije 50Hz i iste efektivne vrijednosti napona. Takođe pokazano je da oscilacije frekvencije oko nominalne ne utiču značajno na izlazne karakteristike mašine za istu efektivnu vrijednost faznog napona. U budućem radu potrebno je odrediti parametre asinhronne mašine napajane iz invertora za različite vrijednosti frekvencije i analizirati njihova odstupanja od onih parametara koji se dobijaju kada se asinhronna mašina napaja iz mreže.

7. LITERATURA

- [1] Krishnan, R.: 'Electric motor drives – Modeling, Analysis and Control' (Prentice Hall, 2001)
- [2] G. Joksimović, "Skripta Asinhronne mašine", ETF Podgorica, 2016.
- [3] B. Mitraković, "Asinhronne mašine", ETF Beograd, 1986.
- [4] V. Vučković, "Električni pogoni", ETF Beograd, 2002.
- [5] Rotating Electrical Machines. Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency From Tests, IEC Standard 60034-2-1, 2007.