

JEDNA REALIZACIJA U/f UPRAVLJANJA BRZINOM ASINHRONOG MOTORA ONE REALIZATION OF V/f SPEED REGULATION OF ASYNCHRONOUS MOTOR

Dragan Stojanović, *Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo*

Sadržaj – U radu je dat teorijski pregled frekvencijskog – U/f upravljanja asinhronim motorom, kao i pregled karakteristika U/f upravljanja u realnom pogonu, te je na kraju prikazana realizacija i rezultati U/f upravljanja u laboratoriji.

Abstract – In this text, theoretical review of V/f regulation of asynchronous motor is given, as well as characteristics review of V/f management in real motor drive, and finally are given results of realisation of V/f speed management in laboratory.

1. UVOD

Jedna od metoda upravljanja asinhronim motorom je frekvencijsko upravljanje, odnosno, upravljanje promjenom napona i učestanosti. Elektronski uređaji koji omogućavaju da se mijenjaju fiksni parametri napojne mreže (napon i učestanost), nazivaju se frekvencijski regulatori (VFD – Variable Frequency Drive). Sve dok se nisu pojavili ovi uređaji nije bilo moguće kvalitetno i efikasno, upravljati brzinom asinhronog motora. Mnogo toga se promijenilo od pojave prvog frekvencijskog regulatora krajem 60 godina, ali su principi rada ostali isti sve do danas.

2. PRINCIP UPRAVLJANJA PROMJENOM NAPONA I FREKVENCije

Proizvod fluksa Φ_{ob} i statorske struje I_s je proporcionalan momentu (1).

$$M \sim \Phi_{ob} I_s \quad (1)$$

Iz izraza za elektromotornu silu E (2), slijedi da je E proporcionalno proizvodu fluksa Φ_{ob} , učestanosti f_s , konstante k_s i broja navoja statora N_s (3).

$$E = 2.22 k_s \Phi_{ob} f_s N_s \quad (2)$$

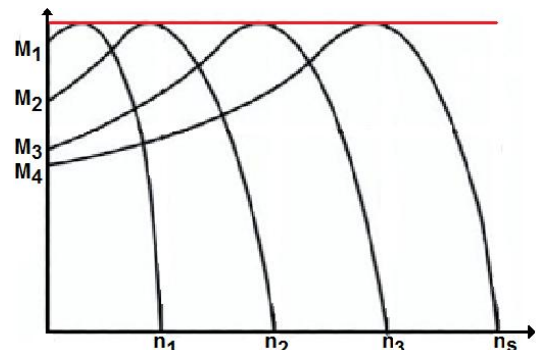
$$E \sim k_s \Phi_{ob} f_s \quad (3)$$

Na osnovu relacija (1) i (3) se može zaključiti da je odnos elektromotorne sile E i učestanosti f_s , proporcionalan momentu M (4).

$$(4)$$

Za parametre mašine koje daje proizvođač Φ_{ob} ostaje nepromijenjeno. Odnos E/f i obrtni moment M su konstantni. Pošto su i elektromotorna sila E i učestanosti f_s funkcije sistema napajanja, njihove promjene mogu mijenjati karakteristiku brzina/obrotni moment M i ako je potrebno pri konstantnom obrtnom momentu.

Mijenjajući napon i učestanost, fino, od većih vrijednosti ka manjim, ili obrnuto, može se postići skoro linearna promjena obrtnog momenta. [2]



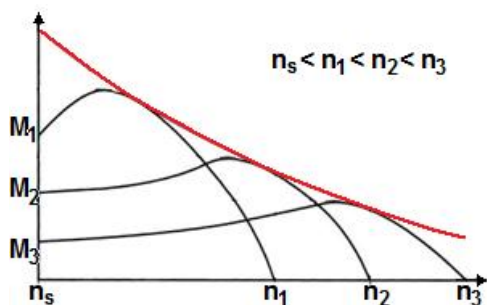
Slika 1, Momentna karakteristika AM pri promjeni napona i učestanosti u oblasti konstantnog momenta

U/f koncept je zamišljen da se mijenja brzina motora pri konstantnom momentu. Ova teorija važi samo za mijenjanje brzine od nule do nominalne brzine motora i obrnuto.

Za povećavanje brzine preko nominalne vrijednosti, teorija U/f neće raditi, zato što bi održavanje U/f konstantnim značilo da napon treba povećati preko nominalne vrijednosti napona napajanja, što nije dozvoljeno. Veću brzinu od nominalne, dalje, postizemo povećavajući samo učestanost napona napajanja, drugim riječima, slabljenjem polja. Za to vrijeme napon ostaje konstantan, tj. jednak nominalnom naponu mreže, tako da se pri povećavanju učestanosti, na osnovu (3) i (4) fluks i moment smanjuju obrnuto proporcionalno brzini. Posljedica smanjenja momenta pri povećavanju brzine je održavanje izlazne snage konstantnom.

$$P = M \cdot n_r \quad (5)$$

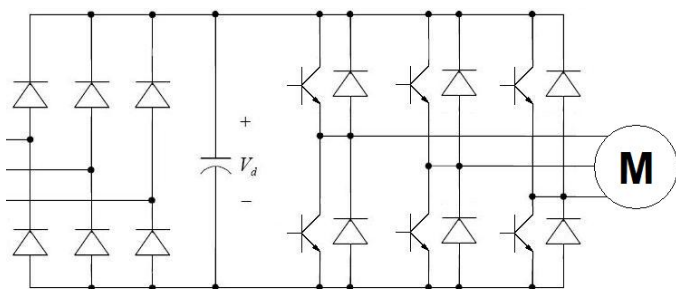
Dakle, možemo postići brzine veće od nominalnih tako što ćemo, sada, smanjivati obrtni moment i činiti $f \cdot M$ konstantnim. Znamo da je brzina na rotoru n_r direktno srazmjerna sa učestanosti rotora f_r pa se iz jednačine (5) jasno vidi da se kontrola brzine ostvaruje pri konstantnoj snazi P (Slika 2). [2]



Slika 2, Momentna karakteristika AM pri konstantnom naponu i promjeni učestanosti u oblasti konstantne snaga

3. FREKVENCIJSKI REGULATOR

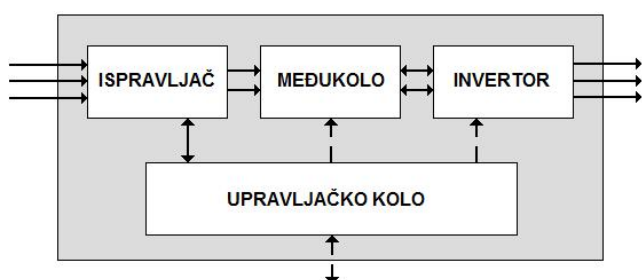
Da bi se ostvarilo dato upravljanje, nepromjenjivi parametri mreže, napon i učestanost, se moraju mijenjati. [1] Fiksni napon mreže je prvo ispravljen u konstantni ili promjenjivi jednosmjerni napon, u zavisnosti od komponenata koje se koriste u kolu regulatora. Pošto je ulazni signal ispravljen, frekvencijski regulatori će prihvatiti i jednofazni ulazni signal kao i trofazni (ponaša se kao konvertor faze). Napon se zatim invertuje da bi se dobio promjenjivi napon i promjenjiva učestanost.



Slika 3, Frekvencijski regulator

Najjednostavnije kolo frekvencijskog regulatora se može podijeliti na četiri dijela:

- Ispravljačko kolo
- Međukolo
- Invertorsko kolo
- Upravljačko kolo



Slika 4, Principijalna blok šema frekvencijskog regulatora

3.1. Ispravljač

Za ispravljanje ulaznog signala se najčešće koristi trofazni diodni mostni ispravljač [1]. To je neupravljiv mostni ispravljač, ali se koriste i polu-upravljivi i puno-upravljivi tiristorski mostni ispravljači. Upravljivi ispravljači omogućavaju rekuperaciju energije u mrežu, ali mane su im što prouzrokuju glavne gubitke i poremećaje u napajanju.

3.2. Međukolo

Međukolo je neka vrsta skladišta iz kojeg inverter vuče energiju. Međukolo može biti formirano na tri načina, u zavisnosti od izvedbe uređaja [1]:

- Uređaj sa konstantnim naponom
- Uređaj sa konstantnom strujom
- Uređaj sa promjenjivim jednosmjernim međukolom

U konvertoru sa konstantnim naponom koristi se jak (elektrolitski) kondenzator kao filter, odnosno kao izvor jednosmjernog napona. U neupravljivom regulatoru, jednosmjerni napon ostaje približno konstantan tokom svakog ciklusa izlaza, a u upravljivom regulatoru istom konstantnom jednosmjernom naponu se može mijenjati amplituda.

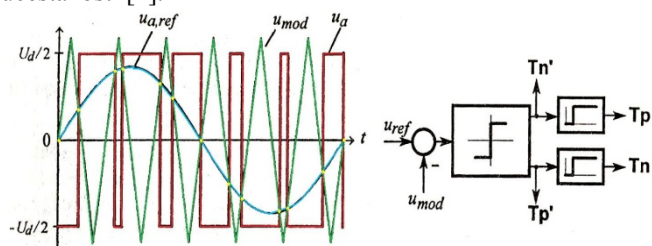
U konvertoru sa konstantnom strujom, postavlja se veliki induktivitet kao filter, odnosno izvor konstantne struje, da bi se dobila približno konstantna struja. Ovo međukolo se isključivo kombinuje sa upravljivim ispravljačem.

U promjenjivom jednosmjernom međukolu, veže se čoper spuštač napona (buck) ispred LC filtra koji služi da izravna izlazni naponski signal iz čopera i da ga drži konstantnim. Čoper ima upravljivu poluprovodničku komponentu kao prekidač, koji uključuje i isključuje ispravljeni napon. Regulaciju uključivanja i isključivanja vrši upravljačko kolo, na osnovu razlike izlaznog napona filtra i ulaznog napona čopera.

3.3. Invertor

Invertor je poslednji stepen frekvencijskog regulatora [3]. Uloga invertora je da ulazni jednosmjerni napon pretvara u naizmjenični, promjenljive učestanosti i amplitude za brzine, tj. učestanosti manje od nominalne, odnosno u naizmjenični napon konstantne amplitude a promjenljive učestanosti, za brzine veće od nominalne.

Pri promjenjivom ili konstantnom naponu međukola, invertori imaju šest prekidačkih komponenti i bez obzira koje su poluprovodničke komponente upotrebljene, funkcije invertora su uvijek iste [4]. Sekvenca rada poluprovodnika je kontrolisana veličinom promjenjivog napona ili struje u međukolu. Koristeći naponski kontrolisan oscilator, učestanost uvijek prati amplitudu napona. Ovakav tip invertora naziva se amplitudno modulisani invertor (PAM). Ostale glavne tehnike koriste fiksni napon međukola. Napon motora se mijenja koristeći napon međukola, duže ili kraće, a frekvencija se mijenja tako što se mjenja dužina trajanja naponskih impulsa, odnosno modulacijom širine impulsa (PWM). Najčešći oblik U/f regulatora je regulator sa konstantnim naponom koji koristi širinsko impulsnu modulaciju (Slika 5) za regulaciju izlaznog napona i učestanosti [1].



Slika 5, Pulse width modulation (PWM) – Širinsko impulsna modulacija

Sa širinsko impulsnom modulacijom, invertorsko prekidačko kolo formira kvazi-sinusoidalni izlazni napon pomoću serije uskih naponskih signala sa sinusoidalnom varijacijom dužine trajanja impulsa.

Razlika između sinusoidalnog signala $U_{a,ref}$, koji ima željenu statorsku frekvenciju f_s i modulacionog trouglastog signala U_{mod} , čija je učestanost f_{mod} cjelobrojni umnožak statorske frekvencije f_s , uvodi se u jedan komparator [1]. Na izlazu se dobije naizmjenični signal pravouglog oblika U_a , čiji pozitivni i negativni dijelovi imaju različita trajanja (različite širine impulsa) po sinusoidalnom zakonu. Ovi signali se koriste za paljenje pomoćnih prekidača T_n' i T_p' a posle odgovarajućeg vremena kašnjenja, za paljenje prekidača T_n i T_p (Slika 2), tako da i talas faznog napona dobije isti takav oblik. Sve tri faze se tretiraju na isti način.

Ova metoda znatno poboljšava talasne oblike struja u motoru, jer se odgovarajućom modulacijom mogu eliminisati viši harmonici.

Još jedan uređaj koji se može koristiti za regulaciju napona i frekvencije je ciklokonvertor [5]. Ciklokonvertor (Cikloinverter) nema ulazni ispravljač, a ni konstantni jednosmjerni napon. Ciklokonvertor pretvara ulazni naizmjenični naponski talas u drugi naizmjenični naponski talas niže učestanosti. Ulazni napon ciklokonvertora je fiksna, a na izlazu se dobije promjenjivi napon i njegova učestanost. Najčešće se koiste u trofaznim sistemima. Izlazna učestanost trofaznog ciklokonvertora mora biti manja od 1/3 ili 1/2 ulazne učestanosti. Kvalitet izlaznog signala je bolji ako se koristi više prekidačkih elemenata. Ciklokonvertori se koriste u velikim U/f regulatorima snage do nekoliko MW. Kao prekidački elementi ciklokonvertora se koriste najčešće SCR (silicon controled rectifier) i rijetko TRIAK.

3.4. Upravljačko kolo

Upravljačko kolo je četvrti važan dio U/f regulatora. Ono obavlja četiri važna zadatka [1]: upravlja poluprovodničkim komponentama regulatora, razmjenjuje podatke između regulatora i perifernih uređaja, skuplja izvještaje i poruke o greškama i ostvaruje zaštitu motora i samog regulatora. Kvalitet i brzina upravljanja su znatno poboljšane uvođenjem mikroprocesora u upravljačka kola, a značajno su se proširile i same mogućnosti regulatora za pokretanje raznih motora i motornih postrojenja.

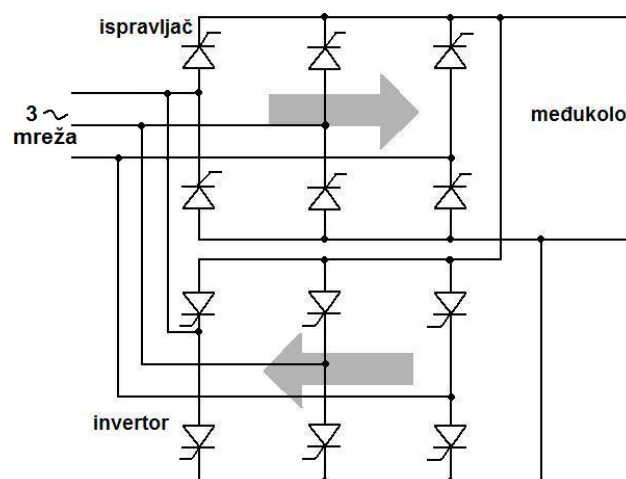
4. KOČENJE

Svrha kočenja je prinudno usporavanje motora zbog smanjenja brzine ili zbog zaustavljanja. Pri procesu kočenja motora dešava se, najčešće, obrnuta konverzija energije tj. pretvaranje mehaničke energije u električnu.

Generalno kočenje se može podijeliti na tri vrste [1]: generatorsko, elektrodinamičko i protivstrujno.

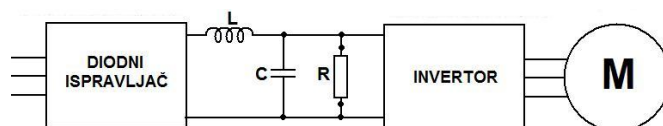
Generatorsko kočenje nastaje u principu, kada motor dođe u stanje da se obrće brzinom većom od sinhrona. Električna energija, nastala pretvaranjem iz mehaničke, pokriva gubitke i preostalu energiju vraća u mrežu. Ovakvo kočenje se još naziva regenerativno kočenje. Regenerativna kočiona jedinica koja se koristi u frekvencijskom regulatoru, za vraćanje energije u mrežu, u slučaju kada je pretvarač sa

upravljivim ispravljačem, se sastoji od jednog ispravljača kome se antiparalelno veže inverter, kao na slici 6:



Slika 6 Antiparalelna veza invertora i ispravljača

Ako se motor napaja preko invertora koji nije reverzibilan, vraćanje energije u mrežu je nemoguće. U ovakvim slučajevima, pitanje viška proizvedene energije se rješava dodavanjem otpornika, s polja, u kolo regulatora kao na slici 6:



Slika 7, Frekvencijski regulator sa otpornikom za kočenje

U otporniku R, povratna energija se troši na zagrijavanje, i samim tim se štiti inverter od prenapona koji se mogu javiti u međukolu regulatora. Korištenje kočionih otpornika omogućava da se savladaju velika opterećenja pri kočenju, veoma brzo, ali ipak i pored kontrole to može prouzrokovati velike probleme sa zagrijavanjem.

Protivstrujno kočenje se postiže unakrsnim prevezivanjem dvije faze motora, tako da se motoru promjeni smjer obrtanja magnetskog polja od smjera obrtanja rotora. Na ovaj način, konstantnim obrtanjem dvije faze motora, rotor se ukoči, ali motor može da zadrži veliki moment i da, npr. dizalica, drži teret na visini. Ovakav vid kočenja se može realizovati pomoću frekvencijskog regulatora, tako što se u inverteru izvrši elektronska promjena fазne sekvence.

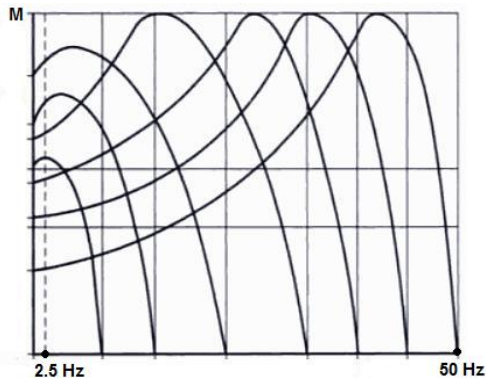
Elektrodinamičko kočenje se ostvaruje kada se kroz namotaje statora propusti jednosmjerna struja. Asinhroni motor se ponaša kao sinhroni, čiji je indukt (rotor) u kratkom spoju [1].

Jednosmjerno (DC) kočenje sa ostvaruje tako što se namotaji statora odvoje sa mreže, a dvije njegove faze prevezu na izvor jednosmjerne struje. Ovakvo kočenje se takođe može lako realizovati u frekvencijskom regulatoru, tako što se pomoću upravljačkog kola, u odgovarajućim vremenskim intervalima, na stator propuste samo pozitivna ili negativna jednosmjerna struja.

5. OGRANIČENJA U METODI U/f UPRAVLJANJA

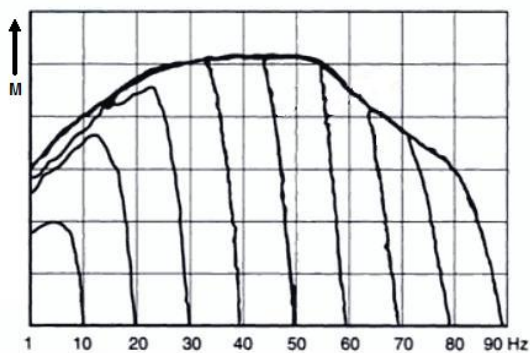
Na slici 1 je prikazana momentna karakteristika kada je zanemaren pad napona na omskom otporu statora. Međutim

ako se ovaj pad napona ne zanemari, momentna karakteristika izgleda kao na slici 8. [2] Kod savremenih mikroprocesorskih sistema ovaj problem se rješava tako što se umjesto linearne zavisnosti $U=f(\omega)$ prethodno proračuna tačnija zavisnost koja je potrebna za stalni fluks, pa se takva nelinearna funkcija ugradi u program u vidu numeričke tablice.



Slika 8, Realna momentna karakteristika AM pri U/f regulaciji brzine

U praksi pri veoma malim brzinama, npr. pri 5% sinhronne brzine ili manje, može se desiti da motor ne razvije obrtni moment koji je dat teoretski, zbog veoma malog napona na statoru, sa jedne strane i zbog relativno velikih gubitaka u namotajima rotora i malog stepena iskorištenja, sa druge strane. Pri brzinama manjim od nominalne, prirodno hlađenje motora može biti jako smanjeno, još više pri veoma malim brzinama, pa je potrebno specijalno konstruisati motor ili obrzbjediti dodatno hlađenje s polja. Praksa nekih proizvođača motora do srednje snage, je da montiraju na motor dodatne ventilatora pokretane iz drugih izvora, da hlađenje ne bi bilo narušeno. [2]



Slika 9, Mjerena momentna karakteristika AM pri U/f regulaciji brzine

Slika 9, ilustruje realne momentne karakteristike za različite učestanosti napajanja [2]. Mogu se vidjeti oštri padovi i prilično nestabilan rad mašine pri veoma malim brzinama.

6. PRIMJENA U/f UPRAVLJANJA

Pomoću frekvencijskog regulatora moguće je dobiti skoro linearnu karakteristiku obrtnog momenta, što omogućava motoru da startuje lagano (soft start).

Struja, koja je funkcija priključnog napona, se ne može kontrolisati pri startu motora, a minimalan napon tokom

starta će zavistiti od karakteristika motora. Pomoću jakih poluprovodničkih komponenata je moguće smanjiti polaznu struju, ali po cijenu smanjenja obrtnog momenta. Preporučuje se da se u pogonima u kojima je urađena ovakva kontrola brzine, prvo pažljivo odredi teret koji odgovara minimalnom početnom momentu motora. Za ovaj početni momenat se odredi polazni napon. Maksimalna početna struja će da zavisi od ovog napona. [2]

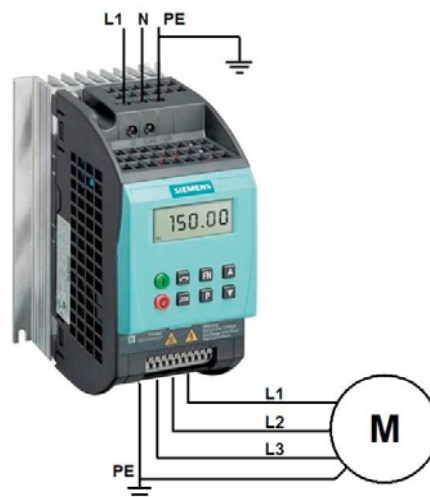
Primjena frekvencijskih reglatora je ograničena na ventilatore, pumpe i kompresore, gdje regulacija brzine ne mora da bude izuzetno tačna i gdje njihov rad pri malim brzinama nije zahtjevan ili nije potreban uopšte. Uglavnom se koriste za mek start i za štednju energije u radu sa promjenjivim opterećenjima.

Napomena: Elektronske komponente su takođe definisane maksimalnom strujom koju mogu da podnesu. Zavisno od primjene, te komponente moraju da podnesu 150% - 300% veću struju od nominalne u trajanju od jedne minute [2]. Ovo je bitno za ostvarivanje što bržih prelaznih procesa, odnosno dobijanja što većeg momenta u prelaznim režimima.

7. PRIMJER U/f UPRAVLJANJA

U sklopu projekta frekvencijskog upravljanja asinhronim motorom, urađena je vježba u laboratoriji za energetsku elektroniku elektrotehničkog fakulteta.

U laboratoriji je korišten SIEMENS-ov frekvencijski regulator SINAMICS G110 za upravljanje trofaznim četveropolnim asinhronim motorom Thurm DDR, snage 0,25kW. Ovaj tip pretvarača radi sa U/f regulacijom i pravi se za snage od 120W do 3 kW za monofazni ulazni priključak. Proizvode se u analognoj ili USS varijanti [6]. Prikladni su za upravljanje pumpama, ventilatorima, pokretnim trakama, itd. Na slici 10 prikazan je izgled regulatora i njegova osnovna šema vezivanja. Na samom regulatoru se nalazi displej, tastatura i ulazni terminal.

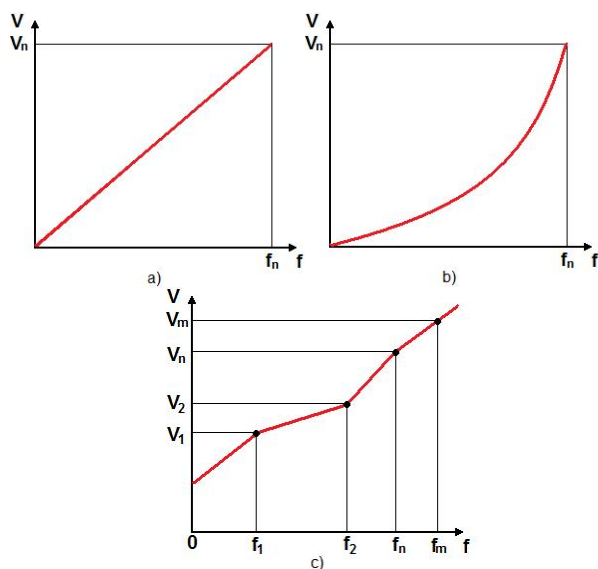


Slika 10, SINAMICS G110S

Da bi upravljanje bilo odgovarajuće efikasno, podaci sa natpisne pločice motora se unose u regulator. U zavisnosti od opterećenja moguće je izbor tri U/f krive:

- linearna (standardno) (Slika 11a);
- kvadratna (kod upravljanja pumpama, ventilatorima...) (Slika 11b);

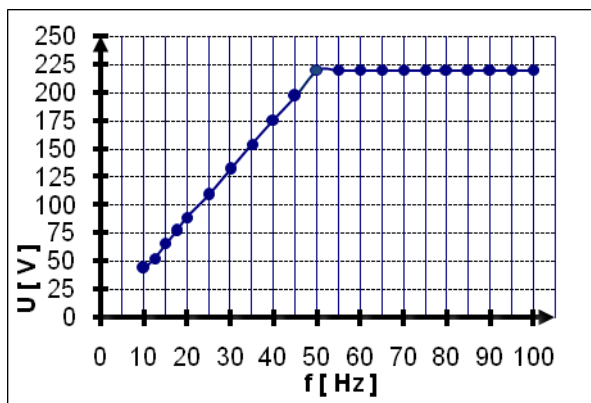
- programabilna (ako postoje naročiti zahtjevi od strane korisnika možemo definistai sopstvenu krivu) (Sika 11c); U ovon radu je korištena linearna U/f kriva.



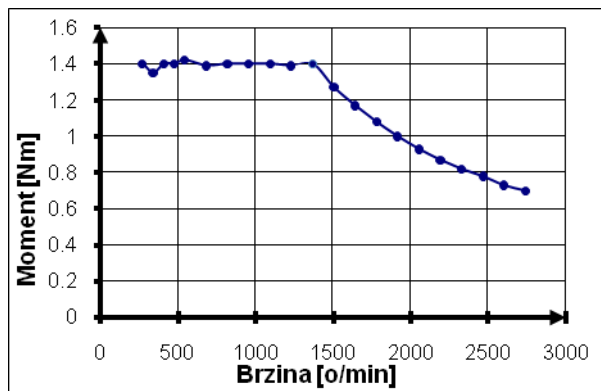
Slika 11 U/f krive

U pripremi vježbe, regulator je podešen da startuje motor sa naponom učestanosti 10Hz. Zatim je motor ubrzavan u intervalima učestanosti od 2.5Hz i 5Hz do 100Hz. Na svakom od ovih tačaka je mjerena napon na motoru.

Na osnovu izmjerenih vrijednosti nacrtana je U/f karakteristika na slici 12 i izračunat je prevalni moment motora i prikazan na slici 13:



Slika 12, U/f kriva, na osnovu mjerenih vrijednosti



Slika 13, Momentna karakteristika motora

Sa slike 13 se može vidjeti da je karakteristika motora približno konstantna u oblasti konstantnog momenta i da je malo nestabilna pri nižim naponima i učestanostima, odnosno brzinama. U oblasti konstantne snage moment motora slabi sa porastom učestanosti, ali se brzina povećava, kao što je rečeno ranije.

8. ZAKLJUČAK

U/f upravljanje asinhronim motorima je veoma dobra metoda upravljanja. Za razliku od klasičnih metoda upravljanja koje su pružale regulaciju brzine u fiksnim koracima ili jako male i nestabilne promjene brzina, pogodnim U/f upravljanjem je moguće dobiti konstantnu promjenu momenta i jako finu promjenu brzine obrtanja motora. Između ostalog, to pokazuje i opisana laboratorijska vježba. Elektronska kola regulatora omogućavaju da polazna stuja motora bude jako smanjena u odnosu na upravljanje nekim od klasičnih metoda. Takođe je lako realizovati upravljanje pomoću PLC kontrolera ili PC računara. Jako je ekonomično upravljanje, štedi mnogo energije i moguće je da motor radi veoma dugo bez prestanka, sa smanjenom brzinom, jer je odnos U/f uvijek konstantan, tako da tok magnetnog fluksa nije narušen i nema opasnosti da motor ode u zasićenje. Dobijanje brzine veće od nominalne je veoma lako, ali je po cijenu slabljenja momenta. Osim toga dugotrajan rad motora na velikim brzinama je uslovljen samom konstrukcijom motora, jer ležajevi često nisu konstruisani da dugotrajno podnose velike brzine. Ipak ovo je idealna metoda upravljanja za ventilatore, pumpe i neke slične pogone, kojima nije potrebna izuzetno precizna i brza promjena brzine, a često zahtjevaju dugotrajan rad sa promjenjivim brzinama.

9. LITERATURA

- [1] Vladan Vučković, *Elektriktrični pogoni*, Akademska Misao, 2002 god.
- [2] K. C. Agrawal, *Industrial power engineering and applications handbook*, Butterworth-Hainemann, 2001 god.
- [3] World Intellectual Property Organization - *Speed control for induction motor with variable voltage – frequency ratio*, (WO/2001/054265), 08.06.2009. god.
- [4] Wikipedia, the free encyclopedia, *Variable frequency drive*, 08.06.2009. god.
- [5] Wikipedia, the free encyclopedia, *Cycloconverter*, 08.06.2009. god.
- [6] Siemens, *SINAMICS G110*, 08.06.2009. god.