



ANALIZA RADA INDUSTRIJSKOG PRETVARAČA UČESTANOSTI PRI GRANIČNIM USLOVIMA NAPAJANJA

INDUSTRIAL VARIABLE SPEED DRIVE PERFORMANCES ANALYSIS IN POWER SUPPLY OPERATING LIMITS

Slaviša Vasić, Dragan Milićević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratka sadržaj – U ovom radu opisan je rad pretvarača učestanosti pri sniženom, odnosno povišenom naponu napajanja za 10 %, odnosno 20 %. Praktično ispitivanje izvedeno je na postavci koja se sastojala od dvije krutom vezom povezane asinhronne mašine napajane iz dva pretvarača učestanosti. Pretvarač učestanosti čiji se rad ispituje je Danfoss FC302, a drugi pretvarač je ABB ACS 880. Rad pri sniženom, odnosno povišenom naponu obezbeđuje ispitna platforma Cinergia B2C+ koja napaja pretvarač učestanosti preko jednosmjernog međukola. Rad pretvarača je ispitan za različite načine upravljanja, U/f, VVC+ i vektorsko upravljanje.

Ključne reči: Pretvarač učestanosti, asinhrona mašina

Abstract – Industrial variable frequency drive performance at reduced or increased supply voltage by 10 % and 20 % is presented in this paper. A practical test was conducted on two mechanically coupled induction machines powered by two variable frequency drives. The variable frequency drive whose performance is being tested is Danfoss FC302, and the drive whose role is to supply the second machine is ABB ACS880. DC bus supply voltage for the tested drive is provided by the Cinergia B2C+. Operation of the drive was conducted for different control principles, U/f, VVC+, and vector control principle.

Keywords: Variable frequency drive, induction machine

1. UVOD

U modernim elektromotornim pogonima, pretvarači učestanosti su nezamjenljivi, a njihovom upotrebom je omogućena automatizacija određenih proizvodnih procesa. Neki proizvodni procesi zahtijevaju određenu brzinu ili momenat koju električna mašina daje na svom vratilu. Ukoliko brzina ili momenat ne bi imali željene vrijednosti, čitav proizvodni proces bi mogao biti ugrožen. Pretvarači učestanosti koji napajaju električne mašine u normalnim uslovima rada mogu da obezbijede potrebno napajanje za održavanje procesa, međutim postavlja se pitanje šta će se desiti ukoliko samo napajanje pretvarača učestanosti nije nominalno, odnosno ukoliko pretvarač radi pri graničnim uslovima napajanja.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dragan Milićević, vanr. prof.

Rad pri graničnim uslovima napajanja podrazumijeva rad pri sniženom, odnosno povišenom naponu napajanja.

Sniženi naponi, odnosno podnaponi se mogu podijeliti u dvije kategorije, a to su kratkotrajni podnaponi i dugotrajni podnaponi. Isto tako povišeni naponi se dijele na kratkotrajne nadnapone i dugotrajne nadnapone.

Kratkotrajni podnaponi koji se još nazivaju i propadima napona. Po IEC standardu (*Voltage Dips*) oni se definišu kao smanjenje amplitude napona, odnosno amplituda napona se nalazi u granicama od 1 % do 90 % vrijednosti nominalnog napona u periodu od 10 ms do 1 min. Po IEEE standardu (*Voltage Sags*) amplituda napona se nalazi u granicama od 10 % do 90 % vrijednosti nominalnog napona. Propade napona mogu da uzrokuju kratki spojevi u mreži, uključivanje potrošača velike snage kao što su asinhronne mašine, kao i veliki reaktivni potrošači.

Dugotrajni podnaponi se nazivaju jednostavno podnaponima i njihovo trajanje je duže od jednog minuta. Neki od uzroka dugotrajnih podnapona mogu biti preopterećeni vodovi ili velika impedansa voda.

Kratkotrajni nadnaponi (*Voltage Swells* ili *Voltage Spikes*) se još nazivaju i prebačajima napona, dok se dugotrajni nadnaponi kratko nazivaju nadnaponima. Uzroci pojave nadnapona mogu biti atmosferska pražnjenja, naglo smanjenje potrošnje ili jednopolni kratki spojevi.

Predmet ovog rada je istraživanje pogonskih karakteristika industrijskog pretvarača učestanosti pri trajnom radu u uslovima napajanja naponom manjim odnosno većim od nazivnog, odnosno rada u trajnim podnaponskim i nadnaponskim uslovima napajanja.

2. POSTAVKA ZA IZVOĐENJE EKSPERIMENTATA

Za potrebe ispitivanja rada pretvarača učestanosti pri graničnim uslovima napajanja neophodno je da asinhrona mašina koju pretvarač napaja (pogonska mašina dalje u tekstu) bude mehanički opterećena. Opterećenje se obezbeđeno drugom asinhronom mašinom (opteretna mašina dalje u tekstu) koja je povezana krutom vezom sa prvom mašinom. Opteretna mašina se takođe napaja iz pretvarača učestanosti. Pogonsku mašinu napaja pretvarač učestanosti *Danfoss FC 302* čiji se rad pri graničnim uslovima napajanja i ispituje. Da bi se mogao ispitati rad pri graničnim uslovima napajanja, odnosno pri sniženom i povišenom naponu mreže, pretvarač učestanosti se ne napaja direktno sa mreže, nego preko jednosmjernog međukola sa platforme *Cinergia B2C+* koja obezbeđuje potreban napon jednosmjernog međukola i na taj način simulira dugotrajne prenapone i podnapone koji se mogu pojaviti u mreži. Napajanjem ispitivanog pretvarača

učestanosti na ovaj način je omogućen i generatorski režim rada pogonske mašine odnosno rad pretvarača učestanosti i u invertorskom i u ispravljačkom režimu rada. Opteretna mašina se napaja preko četvorokvadrantnog pretvarača učestanosti *ABB ACS880*, koja ima mogućnost vraćanja energije u mrežu.

Pogonska i opteretna mašina su asinhronne mašine proizvođača *Končar* i namijenjeni su za široku primjenu u najrazličitijim elektromotornim pogonima. Pogonska mašina je snage 1,1 kW, a opteretna 1,5 kW. Opteretna mašina je veće snage jer je prilikom izvođenja oglada potrebno pogonsku mašinu dovesti u stanje preopterećenja. Obje mašine su u IE2 klasi efikasnosti.

Cinergia B2C+ (*Bidirectional Battery Charger*) je ispitna platforma koja može da se koristi za ispitivanje obnovljivih izvora energije, baterija, električnih vozila, stanica za punjenje i za mnoge druge primjene. U ovom slučaju B2C+ se koristi samo za davanje konstantnog napona pretvaraču učestanosti preko jednosmjernog međukola. Zbog toga je potrebno B2C+ postaviti u paralelan, unipolarni režim rada.

2.1. Principi upravljanja i regulacije brzine i momenta pogonske mašine

Pojavom pretvarača energetske elektronike, omogućen je veliki broj načina za upravljanje i regulaciju brzine i momenta mašina naizmjenične struje. Mnogi od tih principa su bili poznati i ranije, međutim bez pretvarača energetske elektronike nije bila moguća njihova praktična primjena. Pretvarači učestanosti imaju ulogu da upravljaju brzinom i momentom električne mašine tako što napon mreže 400 V, 50 Hz pretvaraju u napon željene amplitude i učestanosti.

U/f upravljanje počiva na ideji da je brzina obrtanja asinhronog motora direktno proporcionalna učestanosti. Povećavanjem, odnosno smanjivanjem učestanosti, mijenja se i brzina obrtanja. Ukoliko se samo mijenja vrijednost učestanosti, onda će se mijenjati i fluks, odnosno vrijednost indukcije u mašini. Smanjivanjem učestanosti, dolazi do povećanja fluksa, odnosno indukcije i mašina može da uđe u zasićenje. Sa druge strane, povećavanjem učestanosti dolazi do smanjenja fluksa, odnosno indukcije, a to znači da će doći do smanjenja momenta koji motor razvija.

Da bi fluks u mašini ostao stalan, odnos napona i učestanosti mora da bude stalan: $U/f = \text{const}$. Zbog toga se ovo upravljanje naziva U/f upravljanje ili skalarno upravljanje, zbog toga što se upravlja modulom statorskog napona i učestanošću, veličinama koje su skalari.

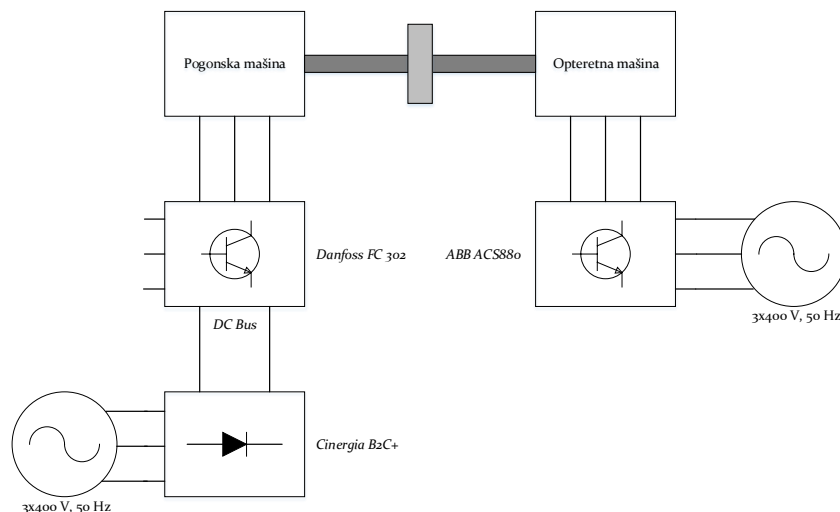
VVC+ upravljanje se primjenjuje ukoliko je potrebno da brzina bude nezavisna od opterećenja. Prilikom povećanja momenta opterećenja, brzina obrtanja opada, a raste klizanje. Na većim brzinama to ne predstavlja problem, međutim pri malim brzinama obrtanja, povećanjem momenta opterećenja, klizanje više nije zanemarivo. Da bi se ostvarila kompenzacija klizanja, potrebno je koristiti U/f upravljanje u zatvorenoj petlji. Vrijednost klizanja se može računati na osnovu mjerene brzine obrtanja pomoću enkodera ili na osnovu mjerenih statorskih struja.

Vektorsko upravljanje se koristi u pogonima u kojima je dinamika veoma bitna. Ideja vektorskog upravljanja je da se fluksom i momentom asinhronne mašine nezavisno upravlja pomoću dva vektora struje, slično upravljanju mašinom jednosmjerne struje, gdje se fluksom upravlja preko napona pobude, a momentom preko struje armature. Na taj način asinhronna mašina postaje linearni konvertor momenta, čije su dinamičke karakteristike bolje i od dinamičkih karakteristika mašine jednosmjerne struje.

U sprovedenim ogledima, pogonska mašina se napajala iz pretvarača učestanosti koje je kontrolisan u sva tri opisana algoritma upravljanja - U/f, VVC+ i vektorsko upravljanje.

3. EKSPERIMENTALNA PROVJERA

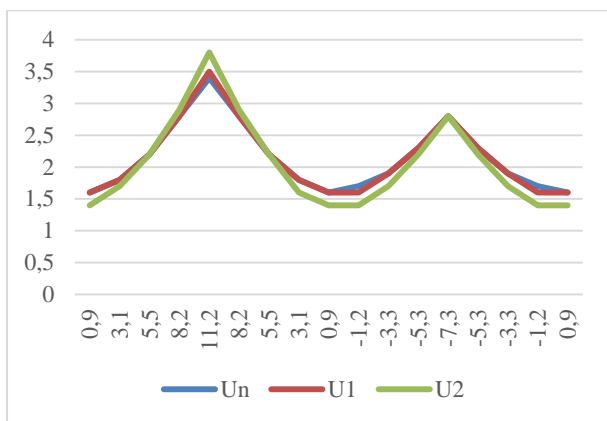
Eksperimenti su izvedeni pri nominalnom naponu napajanja, naponima sniženim za 10 % i 20 %, odnosno naponima povišenim za 10 % i 20 %. Pogonska mašina se obrće nominalnom brzinom koja iznosi $1400 \frac{\text{ob}}{\text{min}}$. Pretvarač učestanosti koji napaja opteretnu mašinu je u momentnom režimu rada, a nominalni momenat opteretne mašine iznosi $M_n = 10,1 \text{ Nm}$. Opteretnoj mašini se redom zadaju momenti: $0\% M_n$, $-25\% M_n$, $-50\% M_n$, $-75\% M_n$, $-100\% M_n$, $-75\% M_n$, $-50\% M_n$, $-25\% M_n$, $0\% M_n$, $25\% M_n$, $50\% M_n$, $75\% M_n$, $100\% M_n$, $75\% M_n$, $50\% M_n$, $25\% M_n$, $0\% M_n$.



Slika 1. Blok šema eksperimentalne postavke

3.1. U/f upravljanje

Kada je primjenjeno U/f upravljanje pri naponu sniženom za 10 %, pretvarač učestanosti radi kao i pri nominalnim uslovima napajanja, brzine se kreću u istim granicama prilikom promjene opterećenja i dolazi do blagog povećanja struje asinhronne mašine. Pri naponu napajanja sniženom za 20 %, brzina je manja nego pri nominalnom naponu napajanja i ta razlika se povećava sa povećanjem opterećenja. U ovom slučaju dolazi do značajnijeg povećanja struje, ali je to povećanje u granicama dozvoljenog sa aspekta strujnog ograničenja pretvarača učestanosti (Slika 2). Pri sniženim naponima napajanja, usled pada reaktivne snage koju pretvarač predaje mašini, aktivna komponenta struje postaje veća nego što je bila pri nominalnom napajanju. Pretvarač ne gubi kontrolu nad mašinom prilikom dostizanja maksimalnog opterećenja, pri sniženim naponima. Pretvarač učestanosti se pri naponima napajanja povećanim za 10 % odnosno 20 % ponaša gotovo isto kao i pri nominalnom naponu napajanja. Brzine se kreću u istim granicama prilikom promjene opterećenja, a dolazi do blagog povećanja struje pri naponu napajanja povećanom za 20% u odnosu na slučaj pri nominalnom naponu napajanja.



Slika 2. Struje pogonske mašine

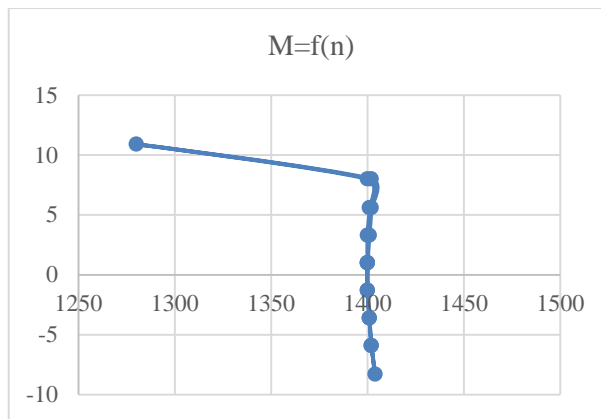
3.2. VVC+ upravljanje

Rad pretvarača sa primjenjenim VVC+ upravljanjem je ispitan za 0 % kompenzacije klizanja, odnosno kao potkompenzovan sistem, za 76 % kompenzacije i za 100 % kompenzacije klizanja, odnosno kao prekompenzovan sistem.

Za 0 % kompenzacije klizanja, pretvarač se ponaša gotovo isto kao i prilikom U/f upravljanja pri nominalnom i naponu napajanja sniženom za 10 %. Pri naponu napajanja sniženom za 20 % pretvarač kada je mašina opterećena maksimalnim opterećenjem gubi kontrolu nad mašinom, što nije bio slučaj kod U/f upravljanja. Pri povećanim naponima napajanja pretvarač radi bez ikakvih problema, vrijednosti brzine i struje se kreću u istim granicama kao i pri nominalnom naponu napajanja.

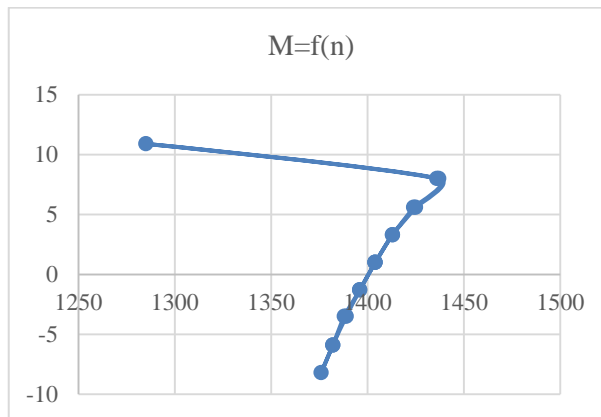
Za 76 % iznos kompenzacije klizanja pretvarač učestanosti pri nominalnom naponu napajanja održava brzinu na približno zadatoj vrijednosti. Pri naponu napajanja sniženom za 10 % pretvarač održava brzinu na zadatoj brzini, osim za maksimalno opterećenje, kada brzina naglo opada i pretvarač gubi kontrolu nad mašinom (Slika 3). Isti slučaj se dešava i pri naponu napajanja sniženom

za 20 %. Iako struja ne dostiže maksimalnu vrijednost koju pretvarač dozvoljava, brzina opada. Pretpostavka je da algoritam VVC+ upravljanja ne uspostavlja na pravilan način vezu između merenih veličina, pre svega faznih struja mašine, i klizanja odnosno brzine vratila mašine. Sprega po brzini je otvorena i pretvarač nema informaciju da je brzina opala, pa ne predaje veću struju mašini. Pri povećanim naponima napajanja, pretvarač održava brzinu na zadatoj vrijednosti, odnosno radi normalno, kao i pri nominalnim uslovima.



Slika 3. Momenat u zavisnosti od brzine pogonske mašine

Za iznos 100 % kompenzacije klizanja, sistem radi kao prekompenzovan. Prilikom povećanja opterećenja dolazi do povećanja brzine mašine (Slika 4). Slično kao i u slučaju 76 % kompenzacije, pri sniženim naponima prilikom dostizanja maksimalnog opterećenja dolazi do naglog pada brzine i pretvarač gubi kontrolu nad mašinom. Pri povećanim naponima napajanja pretvarač radi kao i pri nominalnim uslovima, uz malo povećanje struje koju uzima mašina.



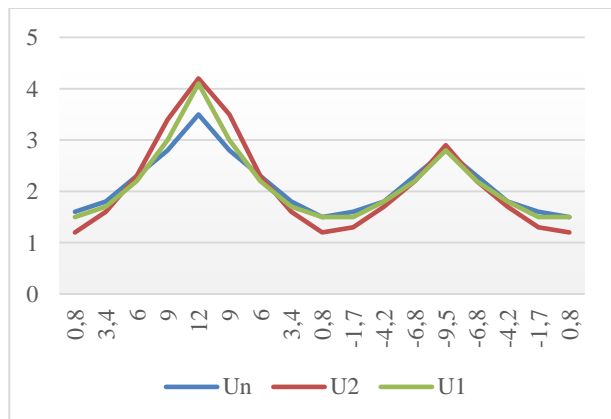
Slika 4. Momenat u zavisnosti od brzine pogonske mašine

3.3. Vektorsko upravljanje

Vektorsko upravljanje predstavlja najsloženiji vid upravljanja mašinom od svih gore navedenih načina upravljanja, jer se radi u zatvorenoj sprezi po brzini i neophodan je senzor brzine. Pri nominalnim uslovima napajanja pretvarač održava brzinu na tačno zadatoj vrijednosti. Pri naponu napajanja sniženom za 10 % pretvarač za sva opterećenja održava zadatu brzinu, a vrijednost struje je veća nego pri nominalnim uslovima napajanja. Prilikom dostizanja maksimalnog opterećenja, vrijednost struje dostiže granice koje pretvarač

dozvoljava i u tom režimu može da radi određeno vrijeme nakon čega dolazi do isključenja pretvarača (prema informacijama iz uputstva za 160 % opterećenje što je ujedno i strujno ograničenje pretvarača, nakon 1 minuta rada dolazi do isključenja pretvarača).

Pri naponu napajanja sniženom za 20 %, pretvarač ne može za maksimalno opterećenje da održi brzinu jer struja prelazi granice dozvoljenog i on gubi kontrolu nad mašinom. Pri povećanim naponima napajanja pretvarač održava brzinu konstantnom.



Slika 5. Struje pogonske mašine pri nominalnom (U_n) naponu sniženom za 20% (U_2) i naponu sniženom za 10% (U_1)

4. ZAKLJUČAK

Može se zaključiti da asinhrona mašina napajana iz pretvarača učestanosti pri naponu napajanja sniženom za 10 %, odnosno 20 %, može da razvije nominalan momenat i da ima sposobnost održavanja zadate brzine. Problem nastaje pri preopterećenju mašine, kada pretvarač gubi kontrolu nad mašinom, što u nekim pogonima može da predstavlja problem.

Primećeno je i to da su mehanizmi rada pri preopterećenju značajno drugačiji za različite primenjene kontrole.

U slučaju U/f upravljanja pretvarač nije „ispadao“ iz rada ali je radio sa značajnom greškom u brzini. VVC upravljanje je sa druge strane pokazivalo totalni gubitak kontrole u slučajevima preopterećenja ali ponašanje je zavisilo od nivoa podešenog stepena kompenzovanja klizanja.

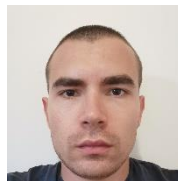
Zbog zatvorene povratne sprege po brzini, vektorsko upravljanje se pokazalo kao način upravljanja koji je najviše otporan, u smislu održavanja zadate brzine, ali sasvim logično i u ovom slučaju se kontrola gubila u slučajevima trajnog preopterećenja kada pretvarač nije imao kapaciteta da obezbedi adekvatno napajanje mašini.

Pri povećanim naponima napajanja nije primećen problemu radu pretvarača. To je i očekivano jer testirani pretvarač klasifikovan da mu je dozvoljen trajan rad pri naponu napajanja do 500 V, 50 Hz

5. LITERATURA

- [1] Marko Vekić, *Kvalitet električne energije*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad predavanja, 2021.
- [2] Slobodan N. Vukosavić, *Električne mašine*, Akademska misao, Beograd, 2010.
- [3] Veran Vasić, Đura Oros, *Energetska elektronika u pogonu i industriji*, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2012.
- [4] Zvonko Benčić, Boris Košuljandić, *Najvažnije o frekvencijskim pretvaračima*, Zagreb, 2009.
- [5] Darko P. Marčetić, *Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima*, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2014.
- [6] *Končar – Mes d. d.* Elektromotori, katalog, 2019.
- [7] *Cinergia – Bidirectional Battery Charger (B2C+)*, Installation and operation manual.
- [8] *Danfoss drives*, Operating Guide.
- [9] *ABB ACS880*, Firmware manual.

Kratka biografija:



Slaviša Vasić rođen je 1997. god. u Bijeljini. Diplomski rad na temu „Generatorski režim rada trofazne kavezne asinhronne mašine napajane iz pretvarača učestanosti“ je odbranio 2020. godine.



Dragan Milićević rođen je 1977. god. u Tuzli. U zvanje vanrednog profesora je izabran 2019. god. Oblast interesovanja su višefazne mašine, elektromotorni pogoni i obnovljivi izvori električne energije.