

MIHA THE MIGHTY 1.D_AUT	FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA ZAGREB	3.1.2013.
	<b>LABORATORIJ AUTOMATIKE 1</b>	
	Vježba br. IV: VEKTORSKO UPRAVLJANJE SINKRONIM STROJEM S PERMANENTNIM MAGNETIMA	

## Opis vježbe

Elektromotorni pogon se sastoji od dva sinkrona stroja s permanentnim magnetima, a svaki od njih je upravljan industrijskim frekvencijskim pretvaračem Sinamics S120. Strojevi su međusobno spojeni krutom vezom. U okviru rada na laboratorijskoj vježbi potrebno je parametrirati frekvencijske pretvarače Sinamics S120, pri čemu jedan stroj predstavlja pogonski stroj, a drugi stroj predstavlja opteretni stroj. Drugim riječima, prvi pretvarač regulira brzinu vrtnje stroja upotrebom mjernog člana brzine vrtnje, a drugi pretvarač radi u režimu regulacije momenta stroja.

Frekvencijski pretvarači parametriraju s uporabom programskog okruženja *Starter* na računalu. Komunikacija između računala i pretvarača ostvaruje se putem *Profinet* standarda. Parametri glavnog stroja podešavaju se za upravljanje sinkronim strojem uporabom enkodera, uspostavlja se komunikacija te se podešeni parametri spuštaju u pretvarač. Opteretni stroj parametrira se na jednak način, pri čemu se dodatno postavlja ograničenje vrijednosti momenta na  $\pm 1.3 [Nm]$ . Tako se omogućuje upravljanje momentom opteretnog stroja. U slučaju kad se pretvaračem upravlja s upravljačke ploče programskog paketa *Starter*, nije moguće zadavati referentnu vrijednost momenta s računala. Upravljanje momentom je moguće na način da pretvarač radi u režimu regulacije brzine te da se u *Starteru* podese ograničenja momenta. Prema tome, kad se na upravljačkoj ploči postavi referentna vrijednosti brzine, opteretni stroj kreće prema zadanoj brzini, sve dok ne dostigne zadano ograničenje momenta. Kada dostigne ograničenje momenta, stroj će se okretati brzinom pogonskog stroja koji će biti opterećen momentom opteretnog stroja. Brzina vrtnje opteretnog stroja razlikovati od njegove zadane brzine vrtnje.

## Popis opreme

Opremu na laboratorijskoj vježbi čine dva sinkrona motora s permanentnim magnetima koji su spojeni pomoću spojke, tj. krute veze, dva frekvencijska pretvarača pomoću kojih se upravlja spomenutim sinronim motorima s permanentnim magnetima, mjerni član brzine vrtnje i osobno računalo s programskim paketom *Starter* pomoću kojeg se paramateriraju frekvencijski pretvarači.

Podaci s natpisne pločice frekvencijskih pretvarača nalaze se u Tablici 1.

Tablica 1. Natpisna pločica frekvencijskog pretvarača

SINAMICS Power Module 340		
Serijski broj	6SL3210-1SE13-1UA0	
Ulaz	$U$ [V]	3~ 380 ... 480
	$I$ [A]	3~ 3.8
	$f$ [Hz]	47 ... 63
Izlaz	$U$ [V]	3~ 0 ... $U_{ul}$
	$I$ [A]	3~ 3.1
	$f$ [Hz]	0 ... 650
$\max U_{DC}$	$1,35 \cdot U_{lin}$	
SINAMICS Control Unit CU310 PN		
Serijski broj	6SL 3040-0LA00-0AA1	
Napajanje	$U$ [V]	DC 24
	$I$ [A]	3.3
Digitalni izlazi	$U$ [V]	DC 24
	$I$ [A]	0.5
$T_a$ [°C]	0 ... 50	

U laboratorijskoj vježbi korišten je *Sinamics S120* frekvencijski pretvarač koji se sastoji od dvije jedinice:

- energetske jedinice (*Sinamics Power Module340*)
- upravljačke jedinice (*Sinamics Control Unit CU310 PN*).

Energetska jedinica sastoji se od trofaznog diodnog mosnog spoja, tj. ispravljača, izmjenjivača i istosmjernog međukruga.

Ulaz energetske jedinice spojen je na napon  $3 \times 400$  VAC. Kako ne postoji mogućnost vraćanja energije u mrežu, dok je motor generatorskom režimu rada, energija se troši na kočnom otporniku.

Podaci s natpisne pločine sinkronog motora s permanentnim magnetima nalaze se u Tablici 2.

Tablica 2. Natpisna pločica SMPM-a

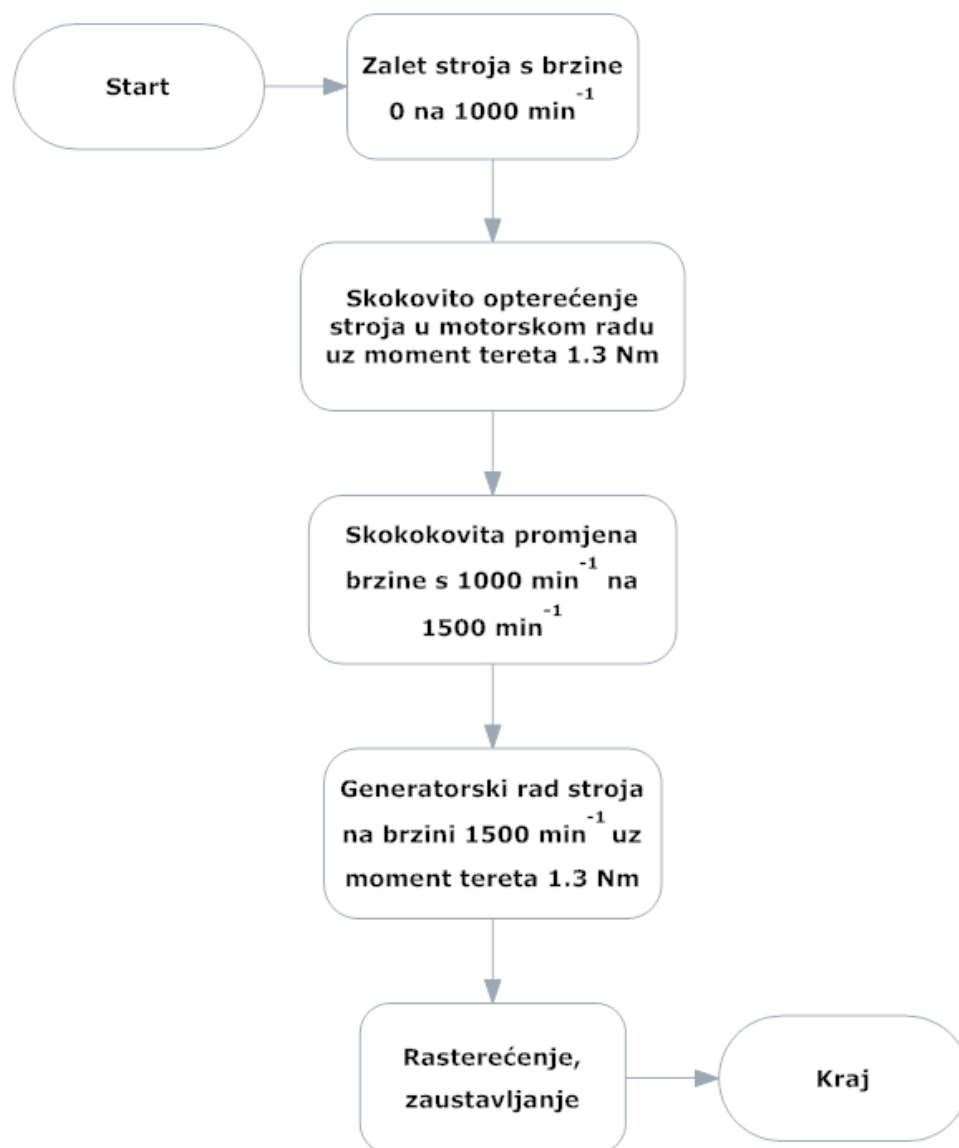
Proizvođač	Siemens, Germany
Tip motora	3~ Synchronous motor
Serijski broj motora	YF X717 3538 01 001
	YF X717 3538 01 002
Tip zaštite	IP 64
Tip izolacije	F
Masa motora	5 kg
Rezolver	$p = 1$ NO1
Standard	En/IEC 60034
$U_n$ [V]	267
$I_n$ [A]	1.95
$I_k$ [A]	2.2
$n_n$ [rpm]	3000
$n_{MAX}$ [rpm]	9000
$M_n$ [Nm]	2.6
$M_k$ [nM]	3

## Odzivi vektorskog upravljanja

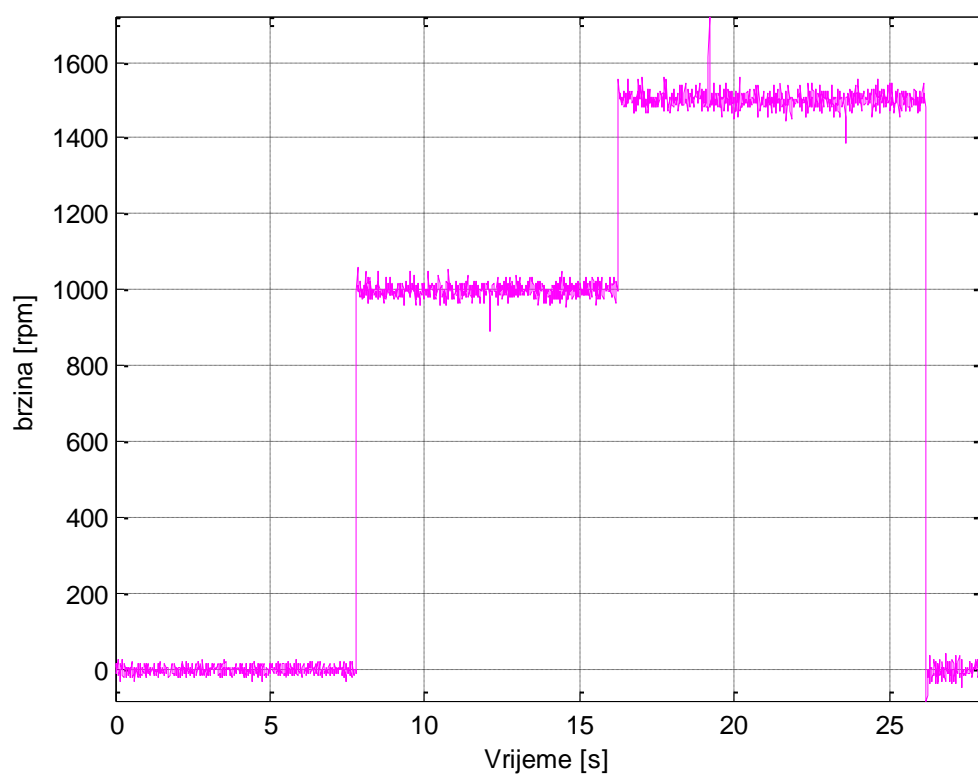
U programskom okruženju *Starter* su prema dijagramu toka na Slici 1. snimljeni odzivi sljedećih veličina:

- brzina vrtnje stroja,
- moment stroja,
- struja  $i_{sd}$ ,
- struja  $i_{sq}$ ,
- napon istosmjernog međukruga.

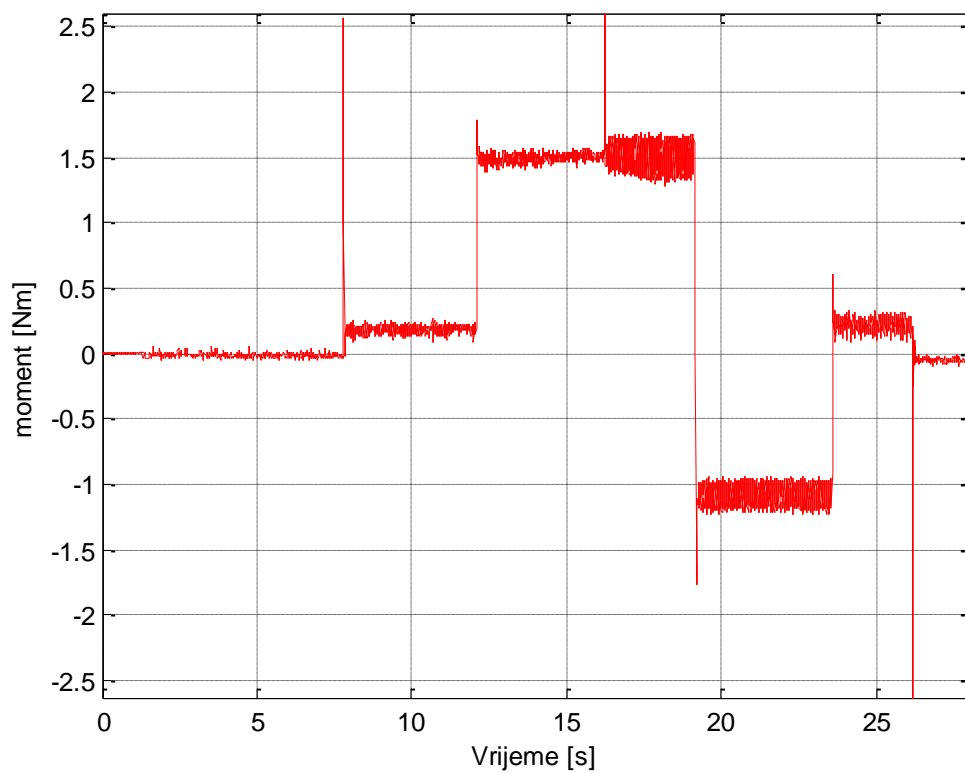
Na Slici 1. prikazan je dijagram toka terećenja pogonskog stroja. Slikama 2. do 6. prikazane su redom ranije navedene veličine.



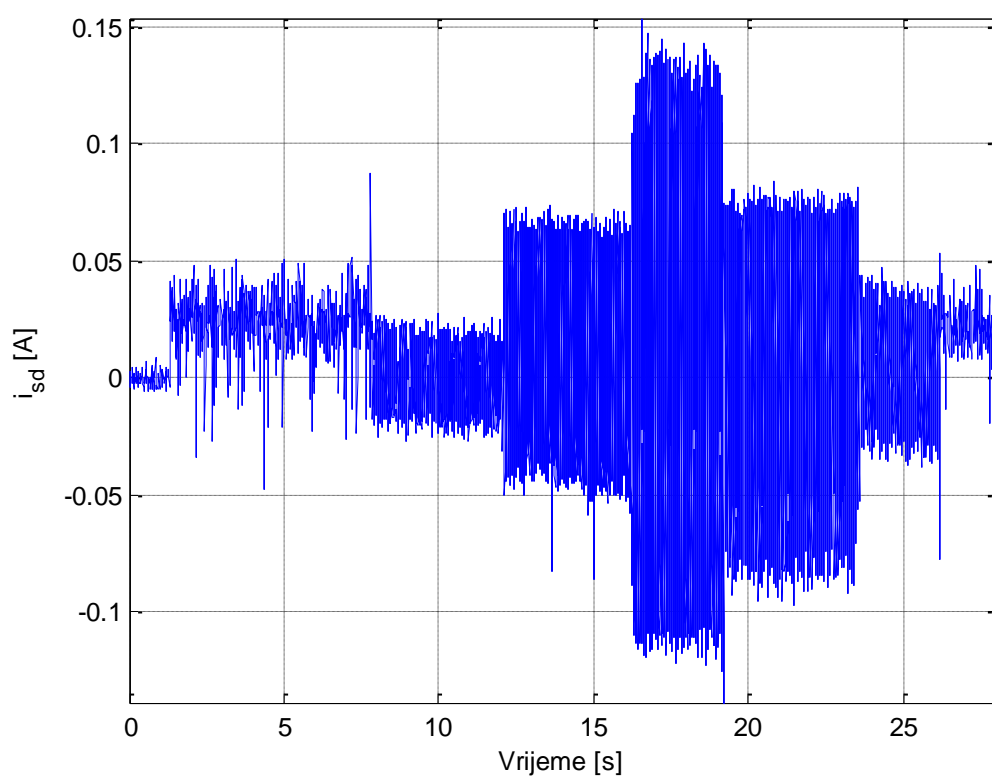
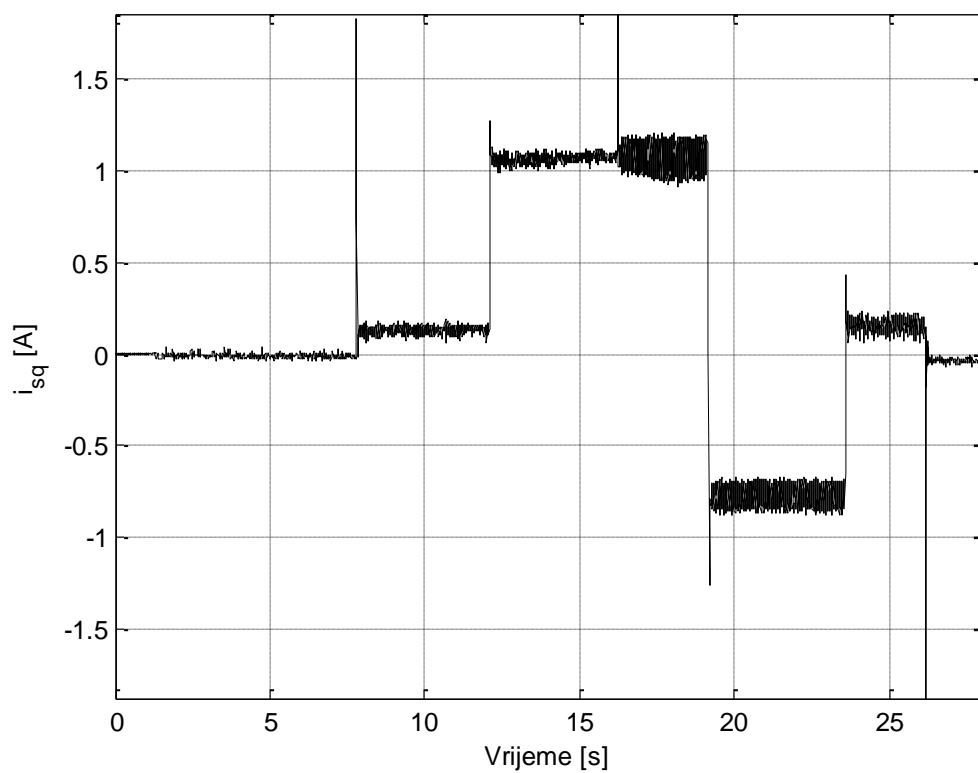
Slika 1. Dijagram toka opterećenja pogonskog stroja

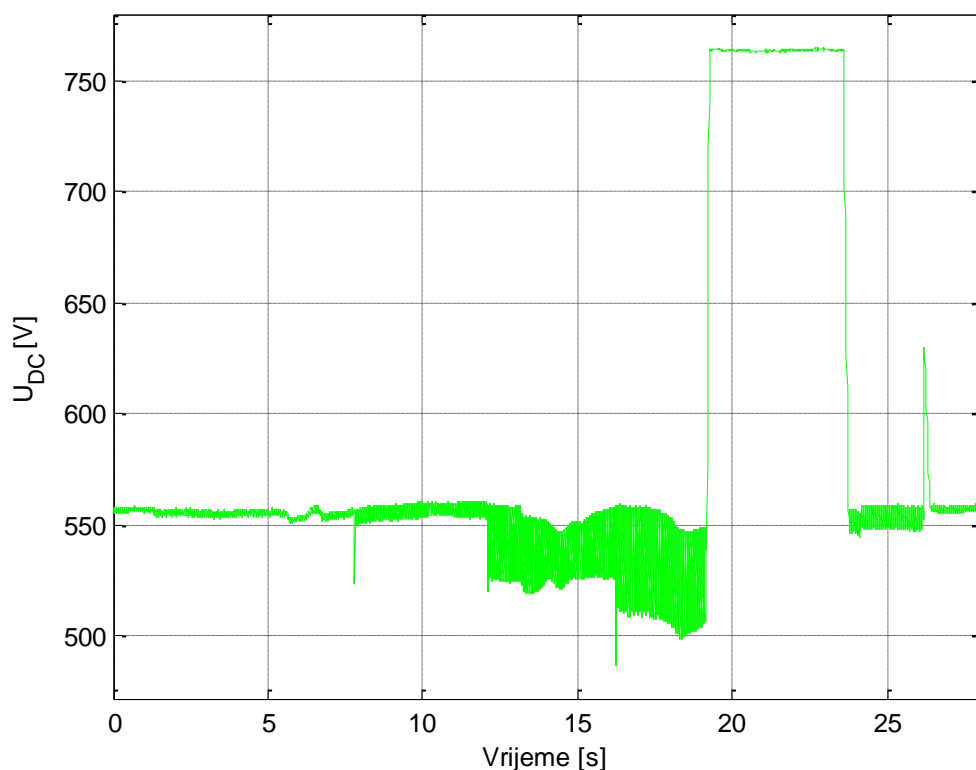


Slika 2. Odziv brzine vrtnje



Slika 3. Odziv momenta pogonskog stroja

Slika 4. Odziv struje  $i_{sd}$ Slika 5. Odziv struje  $i_{sq}$



Slika 6. Odziv napona istosmjernog međukruga

## Komentar odziva za vektorsko upravljanje

U skladu s regulacijom pogonskog stroja po brzini vrtnje te opterećenog stroja po momentu, brzina vrtnje pogonskog stroja prati zadanu referencu, dok se zadavanjem referentne brzine opterećenog stroja putem upravljačke ploče u programskom okruženju *Starter* može mijenjati karakteristika momenta koju pogonski stroj razvija.

Budući da ni u jednom trenutku ne zadajemo referentnu brzinu pogonskog stroja veću od nazivne ( $n_{max} \approx 9000 [rpm]$ ), čitavo se mjerenje odvija u području konstantnog toka pa je srednja vrijednost struje  $i_{sd}$  jednaka nuli, uz male oscilacije amplitude do  $0.15 [A]$ .

Moment pogonskog stroja i struja odgovorna za generiranje momenta,  $i_{sq}$ , su proporcionalni, tj. vrijedi  $m = k_m \cdot i_{sq}$ , uz konstantu proporcionalnosti  $k_m \approx 1.4 [Wb]$ . Njihove karakteristike poprimaju jednaki oblik, što se poklapa s dobivenim odzivima danim Slikama 3 i 5.

U početnom vremenskom intervalu, do  $t \approx 7.8 [s]$ , brzina i moment pogonskog stroja jednaki su nuli, jer je referentna brzina pogonskog stroja jednaka nuli i nema tereta na stroju.

Pri promjeni referentne brzine pogonskog stroja u trenutku  $t \approx 7.8$  [s], kao posljedica razlike između stvarne i referentne brzine događa se nagli porast struje  $i_{sq}$ , a samim time i porast momenta koji ubrzava stroj do zadane brzine. Porast momenta vidljiv je kao „šiljak“ u trenutku  $t \approx 7.8$  s. Iz Slike 2. vidi se da odziv brzine vrlo brz i prigušen. Nakon što se postigne zadana brzina vrtnje, pogonski stroj zadržava vrijednost momenta potrebnog da svlada moment trenja i ventilacije iznosa  $m_{tr,vent} \approx 0.18$  [Nm]. Napon istosmjernog međukruga pretvarača, koji regulira brzinu vrtnje pogonskog stroja, ima skoro pa konstantu srednju vrijednosti iznosa  $U_{DC} \approx 555$  [V], uz neznatne oscilacije amplitude iznosa do 3 [V].

Skokovito opterećenje pogonskog stroja u motorskom načinu rada postiže se zadavanjem referentne vrijednosti brzine opterećenog stroja  $n_{REF,opt} > -1500$  [rpm]. U tom slučaju opterećeni stroj povećava svoj moment zbog odstupanja stvarne brzine od zadane te ulazi u ograničenje momenta koje iznosi 1.3 [Nm]. Moment pogonskog stroja raste kako bi se suprotstavio momentu tereta i održao brzinu vrtnje na željenih 1500 [rpm]. Pritom pogonski stroj osim momenta tereta mora savladati i moment trenja i ventilacije (iznos momenta trenja i ventilacije pokazao se praktički konstantnim, uzimamo  $m_{tr} \approx 0.2$  [Nm]), stoga u motorskom radu razvija moment  $m_{pog} \approx 1.5$  [Nm]. Srednja vrijednost napona istosmjernog međukruga pada do vrijednosti  $U_{DC} \approx 535$  [V]. Pad srednje vrijednosti napona istosmjernog međukruga posljedica je razvijanja većeg momenta pogonskog stroja za koji treba veća struja koju pretvarač vuče iz mreže, što uzrokuje smanjenje napona na priključnim vodovima stroja.

U trenutku  $t \approx 16.2$  [s] referenca brzine pogonskog stroja se skokovito mijenja s zadanih 1000 [rpm] na 1500 [rpm]. Moment pogonskog stroja naglo skače što razvija moment ubrzanja na osovini potreban za postizanje željene brzine („šiljak“ momentne karakteristike u trenutku  $t \approx 16.2$  [s]). Također, kao i ranije, odziv brzine je ponovno vrlo brz i prigušen. Kada stvarna brzina stroja postane 1500 [rpm] moment se vraća na približno jednaku vrijednost,  $m_{pog} \approx 1.5$  [Nm]. Srednja vrijednost napona istosmjernog međukruga i nakon povećanja brzine vrtnje ostaje približno jednaka.

Generatorski režim rada pogonskog stroja postiže se zadavanjem reference brzine opterećenog stroja na  $n_{REF,opt} < -1500$  [rpm]. Opterećeni stroj u početku razvija moment u smjeru momenta pogonskog stroja, što uzrokuje kratkotrajni pozitivni moment ubrzanja na osovini i nagli porast brzine iznad 1500 [rpm] u trenutku  $t \approx 19.2$  [s]. Moment pogonskog stroja tada mijenja smjer kako bi vratio brzinu na referencu zadanih 1500 [rpm] te se ustaljuje na srednjoj vrijednosti  $m_{pog} \approx -1.1$  [Nm], što zadovoljava jednadžbu ravnoteže



momenata  $m_{pog} = m_{opt} + m_{tr,vent}$ , uz  $m_{opt} \approx -1.3 [Nm]$  te  $m_{tr,vent} \approx 0.2 [Nm]$ . Napon istosmjernog međukruga naglo raste, jer se kondenzator u međukrugu puni energijom koju generira opteretni stroj. Kada napon poraste do granične vrijednosti  $U_{DC} \approx 764 [V]$ , uključuje se kočni otpornik na kojemu se dalje disipira energija.

U trenutku  $t \approx 23.5 [s]$  pogonski stroj se rasterećuje tako da se makne kvačica s *Enables* na upravljačkoj ploči pretvarača koji upravlja opterećenim strojem. Zbog rasterećenja pogonskog stroja, u početnom trenutku postoji negativni dinamički moment koji nakratko smanjuje brzinu ispod  $1500 [rpm]$ . Pogonski stroj zatim povećava svoj moment kako bi vratio brzinu na  $1500 [rpm]$  te se ustaljuje na srednjoj vrijednosti  $m_{pog} \approx 0.2 [Nm]$ , što je iznos potreban za savladavanje momenta trenja. Napon istosmjernog međukruga naglo pada natrag na vrijednost od  $U_{DC} \approx 555 [V]$ , jer se energija nakupljena u kondenzatoru troši na razvijanje pogonskog momenta potrebnog za održavanje brzine vrtnje.

Zaustavljanje pogonskog stroja se obavlja postavljanjem referentne brzine na nulu. Zbog velikog skoka reference brzine pogonski stroj razvija kratkotrajni negativni moment velikog iznosa. Nakon dostizanja referentne brzine jednake nuli, moment se ustaljuje oko nule.

## Zaključak

U ovoj vježbi analizirano je ponašanje karakterističnih veličina pri radu sinkronih strojeva s unutarnjim permanentnim magnetima. Uzbudni tok kod tih strojeva stvaraju permanentni magneti rotora, a struja  $i_{sd}$  je praktički jednaka nuli pri regulaciji do nazivne brzine vrtnje. U slučaju regulacije brzine vrtnje iznad nazivne (što nije analizirano u okviru ove vježbe), sa  $i_{sd} < 0$  stvara se armaturni tok koji se suprotstavlja toku magneta rotora, te se na taj način slabi magnetsko polje u zračnom rasporu. Odziv brzine sinkronog stroja s permanentnim magnetima iznimno je brz i nema velikih nadvišenja. Zbog toga se ti strojevi koriste u primjenama koje zahtijevaju visoku radnu brzinu vrtnje motora i brzu dinamiku.