

Управљање синхроним мотором са сталним магнетима

Студентски рад

Митар Грче

студент другог циклуса студија
Електротехнички факултет, Универзитет у Источном Сарајеву
Источно Сарајево, Република Српска, БиХ
mitar.gr@gmail.com

Сажетак—У овом раду је описана конструкција и принцип рада синхроног мотора са сталним магнетима (СМСМ) као и његово пуштање у рад без оптерећења на вратилу са промјенама брзине у току рада. Управљање брзином је регулисано помоћу фреквентног претварача *Siemens SINAMICS S120* коришћењем програма *Starter*. У практичном дијелу је вршено снимање означених електричних параметара за задате промјене брзине преко рампи *Function generator*-а и дата анализа добијених резултата.

Кључне ријечи—СМСМ; фреквентни претварач;

I. УВОД

Машине наизмјеничне струје се дијеле на асинхроне и синхроне машине. Код обје врсте, у проводницима статора постоје наизмјеничне струје које стварају обртно магнетско поље [1]. Статор синхроног мотора је по конструкцији истовјетан статору асинхроне машине, тј. има трофазни намотај, док се на ротору налазе стални магнети. Постављањем сталних магнета на ротор умјесто намотаја, као у случају асинхроног мотора, смањени су губици у бакру машине, а самим тим и одвођење топлоте је знатно [2]. Синхрони мотори са сталним магнетима на ротору налазе широку примјену у сервопогонима високих перформанси, односно у системима управљања кретањем [1]. У конкретном случају описаном у раду синхрони мотор са сталним магнетима управљан је преко фреквентног претварача. Задавањем рампи брзине из програма *Starter* постигнути су различити режими рада са промјенама брзине у току рада, при чему су снимане карактеристике брзине и електричних напрезања мотора.

II. СИНХРОНИ МОТОРИ СА СТАЛНИМ МАГНЕТИМА

Синхрони мотори са сталним магнетима немају потребу за побудним намотајима и клизним прстеновима, али за разлику од релуктантних мотора, располажу пуним синхроним моментом. Због тога, а и због беструјног ротора коме није потребно хлађење, имају велики специфични максимални момент (сведен на јединицу масе) и малу механичку инерцију, па конкуришу асинхроном мотору

код регулисаних погона малих снага (реда киловата и мање), којима је неопходан брз одзив при регулацији брзине и положаја (нпр. код алатних машина и робота). Међутим, они су знатно скупљи од асинхроних мотора, прије свега због специјалног материјала за сталне магнете и конструктивних тешкоћа око монтирања ових магнета на ротор. Од магнета се тражи довољно висока максимална густина флукса (због максималног момента) и велика коерцитивна сила (због отпорности на размагнетисавање у случају кратког споја), што се постиже скупим легурама од ријетких земаља, као што је нпр. самаријум-кобалт (1 Т, 7000 А/см). Погонске особине ових мотора су исте као код обичних синхроних мотора сем оних које су везане за његове конструктивне одлике, а то су:

- нема могућности мијењања побуде (константна електромоторна сила E , односно еквивалентна побудна струја),
- релуктантни момент је занемарљив и уз то има супротан ефекат (јер је, због простора потребног за улијегање магнета у подужној оси, $X_q > X_d$),
- нема амортизатора, па ни асинхроног момента.

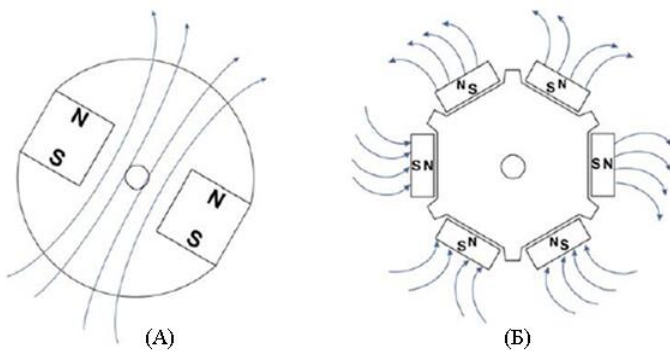
С обзиром да се синхрони мотори са сталним магнетима употребљавају редовно у спреси са регулисаним претварачима учестаности, а за мале снаге, немогућност регулисања реактивне снаге због непромјенљивости побуде нема практичног значаја. Исто важи и за проблем пуштања у рад, јер се континуалном регулацијом брзине у широком опсегу то само по себи рјешава. Једини недостатак који је последица непромјенљивости побуде је у суженом опсегу брзине изнад оне која одговара максималном напону и одговарајућој учестаности претварача; прелазак из опсега константног момента у опсег константне снаге (у опсег слабења поља) може се обезбиједити смањивањем побуде само индиректним путем - повећањем негативне подужне реакције индукта.

Друга важна особина погона са синхроним моторима са сталним магнетима, која потиче од начина примјене ових

мотора, односно напајања из претвараача учестаности, јесте да стабилност није ограничена углом оптерећења δ , као што је то случај код стандардног синхронног мотора - Зато је могуће користити пуни опсег овога угла све до $\delta = 90^\circ$, када момент достиже теоријски максимум. То је последица тога што се претвараачи учестаности из којих се мотор напаја синхронизују са положајем ротора помоћу специјалних сензора угла монтираних на вратило мотора (енкодера или ресолвера)[4].

III. РОТОР СА СТАЛНИМ МАГНЕТИМА

На мјесто побудног намотаја синхроне машине може се уградити стални магнет, који даје могућност да се добије флуks ротора без присуства намотаја и струја на ротору. Током рада машине, ротор се обрће у синхронизму са пољем статора, тако да у устаљеном стању нема промјене магнетске индукције у магнетском колу ротора. У одсуству губитака у намотају ротора и губитака у магнетском колу ротора, нема ни ослобађања топлоте током рада. Као последица, хлађење ротора не представља проблем, па се може конструисати ротор мањих димензија. Проблем синхронних машина са сталним магнетима је у отежаној промјени флуksа, што ствара потешкоће при раду у режиму слабења поља. Магнети могу бити уграђени на површи магнетског кола (*surface magnet*) или у унутрашњости (*interior magnet, buried magnet*) магнетског кола (Сл. 1). Начин уградње магнета има велики утицај на параметре машине и њене експлоатационе карактеристике. Индуктивност статора је одређена магнетском отпорношћу која се значајно мијења у зависности од начина уградње магнета. Код синхронних машина са унутрашњом монтажом сталних магнета, релативни износ индуктивности је од 0,1 до 0,5 док је код машина са површинском монтажом магнета овај износ од 0,01 до 0,1.

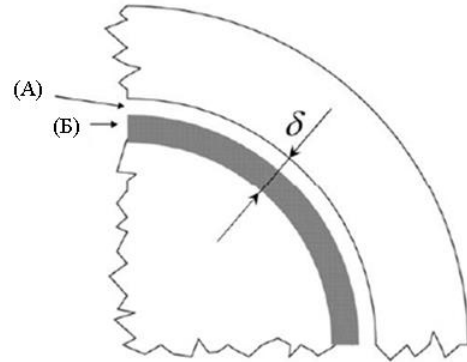


Слика 1. Ротор синхроне машине са: (А) унутрашњом монтажом сталних магнета. (Б) са сталним магнетима на површи ротора. [5]

Синхроне машине са сталном побудом имају већи степен корисног дејства од свих других машина. Биланс снаге стално побуђених синхронних машина је упоредив са билансом снаге асинхронних машина, с тим што код синхронних машина не постоје губици у ротору $S_{\text{пов}}$, што значајно увећава степен корисног дејства [5].

IV. УТИЦАЈ НАЧИНА УГРАДЊЕ МАГНЕТА НА ПАРАМЕТРЕ МАШИНЕ

Стални магнети се могу монтирати на површи ротора. Тада линије магнетског поља из статорских зубаца прелазе у ваздушни зазор δ_0 , улазећи потом у сталне магнете дебљине δ_{PM} , и завршавајући у магнетском колу ротора (Сл. 2).



Слика 2. Магнетска отпорност синхроне машине са површински уграђеним сталним магнетима. (А) Еквивалентни ваздушни зазор. (Б) Стални магнети. [5]

Резултантни флуks статорског намотаја садржи компоненту Ψ_{mR} створену дјеловањем магнета, као и компоненту L_{SiS} створену статорским струјама, пропорционалну статорској индуктивности. Индуктивност статора $L_S = N^2/R_\mu$ зависи од магнетске отпорности R_μ , који се, у условима када је $\mu_{Fe} \sim \infty$ своди на магнетску отпорност зазора,

$$R_\mu = \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad (1)$$

Диференцијална пермеабилност магнета је једнака μ_0 , што значи да магнетски материјал пружа отпор промјени статорског флуksа на једнак начин као и ваздух. Стога је еквивалентни зазор једнак збиру

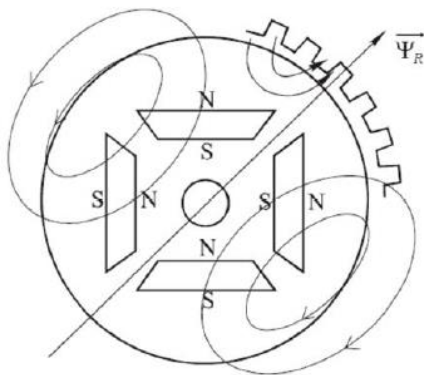
$$\delta = \delta_0 + \delta_{\text{PM}} \quad (2)$$

растојања δ_0 између статора и ротора (то јест механичког зазора) и дебљине магнета δ_{PM} . Дебљина магнета је вишеструко већа од механичког зазора. Стога је индуктивност статора синхронних машина са површинском монтажом магнета веома мала, реда величине 1%, за разлику од индуктивности машина са сталним магнетима уграђеним у унутрашњост магнетског кола ротора, која узима вриједности од 10% до 70%.

Мала индуктивност статорског намотаја смањује реактансу машине $X_S = \omega_S L_S$. Будући да се синхроне машине са сталним магнетима најчешће напајају из трофазних транзисторских инвертора са ширинском модулацијом, умањена индуктивност статорског намотаја

резултује увећањем валовитости струје ΔI . Ширински модулисани импулси амплитуде E се понављају са фреквенцијом комутација $f_{PWM} = 1/T \approx 10\text{--}20\text{ kHz}$, стварајући мање осцилације статорске струје око жељене вриједности, назване валовитост. Амплитуда осцилација струје на комутационој учестаности је приближно једнака $\Delta I \approx ET/(4L_S)$. Будући да површинска монтажа магнета даје мање вриједности индуктивности L_S , то се комутациона фреквенција транзисторских инвертора, који напајају синхроне машине са површинском монтажом магнета, увећава и узима вриједности $f_{PWM} > 10\text{ kHz}$.

Магнети се могу уградити и унутар нарочито начињених отвора у дијеловима магнетског кола ротора ближе вратицу (Сл. 3). Тада се испод статорских зубаца не налази тијело магнета, већ гвоздени лимови од којих је начињено магнетско коло ротора. Поље створено статорским струјама пролази кроз ваздушни зазор и прелази у феромагнетик ротора чија је пермеабилност веома велика. Стога је еквивалентни магнетски зазор $\delta = \delta_0 + \delta_{PM}$ једнак ваздушном зазору δ_0 . Магнетска отпорност на путу статорског флуksа је тада значајно мања, па се имају значајно веће вриједности индуктивности статора. Код унутрашње уградње магнета, релативне вриједности статорске индуктивности и реактансе се крећу између 10% и 70% [5].



Слика 3. Магнетска отпорност синхроне машине са сталним магнетима уграђеним унутар магнетског кола ротора [5]

V. ПРАКТИЧНА АНАЛИЗА РЕГУЛАЦИЈЕ БРЗИНЕ СИНХРОНИХ МАШИНА

У наредном излагању ће бити описана практична реализација електромоторног погона (ЕМП) са синхроним мотором са сталним магнетима, управљаног преко фреквентног претварача из програма *Starter*. За реализовани електромоторни погон ће бити одрађени и практични примјери пуштања у рад мотора. У практичним примјерима ће се посматрати електродинмичке карактеристике мотора у зависности од брзине мотора. Мотор ће бити пуштан у рад са различитим захтјевима у погледу достизања задате брзине и за такве различите задате парамете брзине ће се анализирати електродинмичка напрезања мотора.

A. Фреквентни претварач

Фреквентни претварач *Siemens SINAMICS S120*, намијењен за потребе управљања асинхроним мотором и синхроним мотором са сталним магнетима. Основне компоненте (модули) претварача *SINAMICS S120* су:

- управљачка јединица (Сл. 4).
- исправљачка јединица (eng. LM, Line Module)
- инверторска јединица, за напајање мотора (енг. MM, Motor Module) [6].



Слика 4. Sinamics S120 (управљачка јединица CU310 PN) [6]

1.1 Програм за рад са Sinamics S120 фреквентним претварачем - Starter

Програмски пакет *Starter* се користи за параметризацију и пуштање у погон претварача *Siemens* из серије *Micromaster* и *Sinamics*. Осим пуштања у погон, *Starter* се користи и за:

- тестирање,
- оптимизацију параметара претварача и
- дијагностику[6].

B. Практични рад у лабораторији синхроног мотора са сталним магнетима

Практични дио рада се изводи у сврху испитивања карактеристика синхроног мотора са сталним магнетима (СМСМ) у току пуштања у рад. Биће испитиване промјене струје, момента, излазне фреквенције и тренутне брзине мотора које настају услед задавања различитих вриједности референтне брзине. Испитивања ће бити рађена за случај покретања мотора без задавања рампе брзине и за различите облике рампи брзине.

C. ЕМП са синхроним мотором са сталним магнетима

У практичном дијелу рада у лабораторији је спојен електромоторни погон који користи трофазни синхрони мотор са сталним магнетима, *Siemens* (1FK7060-5AF71-1DG3), којим се управља преко електричног претварача

Siemens SINAMICS S120 промјеном фреквенције. Претварач има програмску подршку у виду програма *Starter* којим је помоћу рачунара поједностављено управљање погоном (Сл. 5).



Слика 5. Изглед ЕМП-а са СМСМ у лабораторији

D. Параметри претварача и мотора с натписне плочице

Напојна јединица претварача:

- Улаз: 3AC 380 – 400V 4,8A 50-60Hz,
- Илаз: 3AC 0 – улазни напон $I_n = 4,1A$.

Синхрони мотор:

TABELA I. ПОДАЦИ С НАТПИСНЕ ПЛОЧИЦЕ МОТОРА

3 ~ Motor 1FK7060-5AF71-1DG3					
No.YF C132 9233 01					
M0 6 Nm		I0 4,5 A		nmax 7200 /min	
Mn 4,7 Nm		In 3,7 Nm		nN 3000 /min	
Encoder IC22DQ C05		UIN 254 V		IP64	
				m 7 kg	

E. Карактеристике у току пуштања у рад и промјене брзине СМСМ

Битна напомена за све практичне примјере из лабораторије је да су сви тестови рађени без оптерећења на вратилу мотора.

F. Примјер 1

У првом примјеру је вршено пуштање СМСМ у рад и мјерење тренутне струје и брзине на излазу у односу на задату вриједност брзине.

Управљање је извршено из управљачког панела у *Starter*-у, а у *Trace*-у су изабране величине чија ће промјена бити праћена на временском дијаграму. Подешена брзина је била $n=500 \text{ obrt./min}$.

На дијаграму (Сл. 6) се виде тренутне вриједности струје и брзине на излазу и одзив брзине на излазу у односу на задату брзину. Мјерени сигнали на графику су означени различитим бојама (црвена – струја, жута – задата брзина, зелена – брзина на излазу мотора).

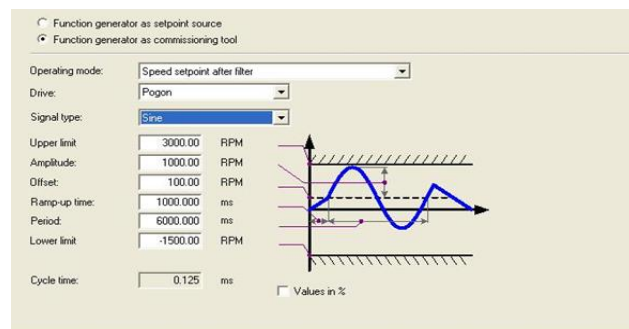
Због тога што није коришћен *Function generator*, залет мотора из стања мировања до задате брзине је скоро па тренутан. Последица тога је велики скок струје у односу на номиналну струју, али је трајање те струје у току залета незнатно, због чега неће доћи до преоптерећења. Тренутна брзина на излазу је нешто мања у односу на задату.



Слика 6. Временски дијаграм пуштања у рад СМСМ из управљачког панела

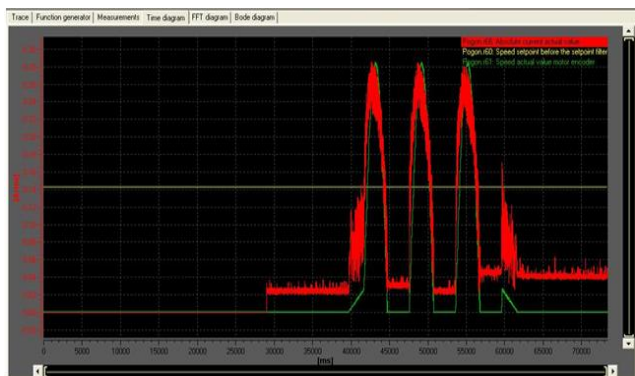
G. Примјер 2

У овоме примјеру је као и у свим осталим вршено пуштање СМСМ из *Function generator*-а у *Starter*-у, гдје је задата рампа брзине синусног облика, али без промјене смјера обртања ротора (Сл. 7).



Слика 7. Function generator синусног облика

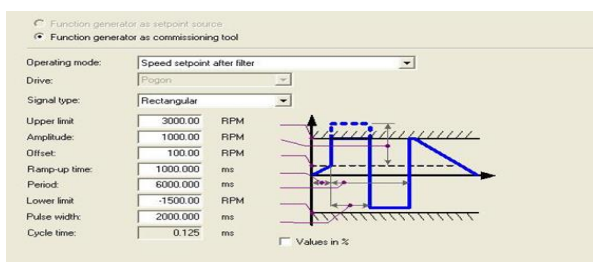
Мјерени сигнали на графику су као и у претходном примјеру означени различитим бојама (црвена – струја, жута – задата брзина, зелена – брзина на излазу мотора). На дијаграму (Сл. 8) се види временска зависност струје и тренутне брзине на излазу. Са дијаграма се да примијетити да је у погледу електродинимичких напрезања лакше за мотор ако се не захтијева тренутни скок брзине од нуле до задате вриједности, него се зада неко успонско вријеме за које мотор постепено подиже брзину до задате. Последица оваквог пуштања мотора у рад је и мања полазна струја, која је мања у односу на случај када се не користи *Function generator*. Тренутна струја прати синусну функцију брзине у времену (за позитивну периоду, јер негативна није задата у *Function generator*-у), тако да за већу вриједност брзине и струја расте.



Слика 8. Временски дијаграм пуштања у рад СМСМ из Function generator-a

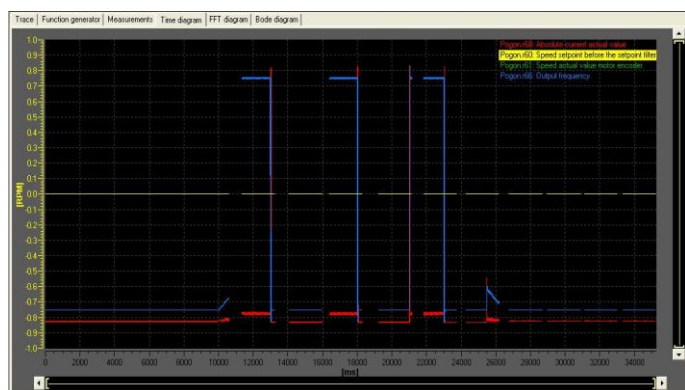
Н. Примјер 3

У овоме примјеру је такође вршено пуштање у рад СМСМ из Function generator-a у Starter-у, гдје задата рампа има облик, без промјене смјера обртања ротора (Сл. 9)



Слика 9. Слика 5.32 Function generator

Боје мјерених сигнала су исте као у претходним примјерима, с тим што је сигнал за излазну фреквенцију плаве боје.



Слика 10. Временски дијаграм пуштања у рад СМСМ из Function generator-a

На дијаграму (Сл. 10) је дата временска зависност струје, брзине и излазне фреквенције за управљање мотором из Function generator-a у Starter-у. Рампа је подешена тако да је омогућена промјена смјера обртања

ротора. Мјерени сигнали су на дијаграму означени istim бојама као у претходном примјеру.

Са дијаграма се види како се наведени параметри мијењају у току покретања и рада мотора. Разлика у полазној струји мотора у односу на случај у Примјеру 1 је видљива на дијаграму, а последица је управљања из Function generator-a, гдје је дефинисањем времена рампе смањена и полазна струја. Такође се види и временска зависност фреквенције која прати функцију излазне брзине са којом је у директној зависности, тј. излазна брзина је директно пропорционална фреквенцији, јер се регулација брзине врши регулацијом фреквенције преко фреквентног претварача.

И. Примјер 4

На дијаграму (Сл. 11) је дата временска зависност струје, брзине и излазне фреквенције за управљање СМСМ из Function generator-a у Starter-у. Рампа има синусни облик и није подешено да се мијења смјер обртања ротора, због чега сигнали немају синусни облик у негативној периоди. Мјерени сигнали су на дијаграму означени istim бојама као у претходном примјеру.



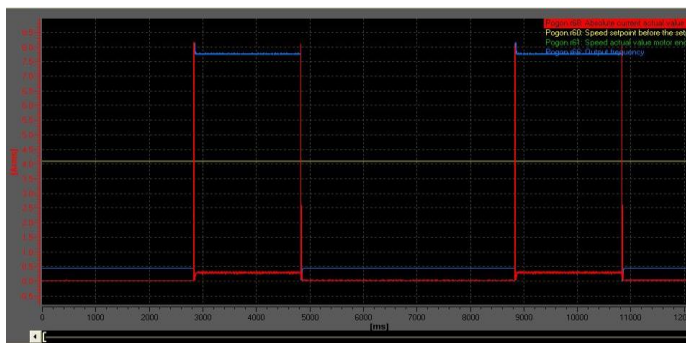
Слика 11. Временски дијаграм пуштања у рад СМСМ из Function generator-a

Са дијаграма се види утицај стрмине рампе на струју, што је објашњено у Примјеру 2. Овдје је значајно уочити однос струје и излазне фреквенције које имају синусну временску зависност као и брзина. Битно је уочити да је промјена фреквенције у директној зависности са излазном брзином, јер се заправо регулација брзине врши регулацијом фреквенције преко фреквентног претварача.

Ј. Примјер 5

На Сл.12 дат је дијаграм за временску зависност струје, брзине и излазне фреквенције за управљање СМСМ из Function generator-a без подешавања за вријеме рампе. Мјерени сигнали су на дијаграму означени istim бојама као у претходном примјеру. Због тога што нема дефинисаног времена рампе мотор стартује скоро одмах задатом брзином, због чега долази до веће полазне струје, а са струјом расте и момент. Због оваквог отежаног покретања мотора веће је и електродинамичко оптерећење мотора. И на овом дијаграму се види да је промјена фреквенције у директној зависности са излазном брзином,

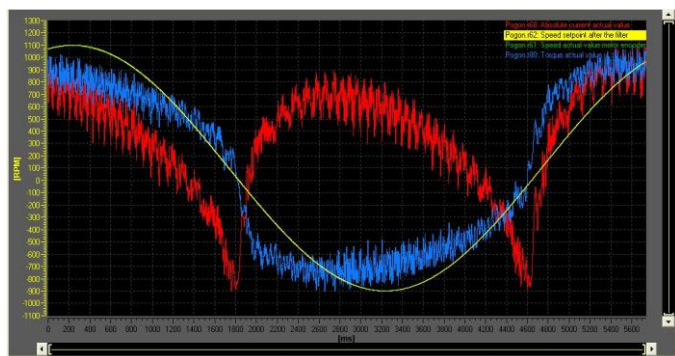
јер се заправо регулација брзине врши регулацијом фреквенције преко фреквентног претварача.



Слика 12. Временски дијаграм пуштања у рад СМСМ из Function generator-a

К. Примјер 6

За овај примјер је коришћен *Function generator* синусног облика у којем су дефинисани параметри рампе за пуштање у рад СМСМ. По избору типа сигнала по којем се мијења брзина, задају се и вриједности номиналне брзине мотора, амплитуда брзине, офсет, вријеме рампе, период, доња граница брзине и циклично вријеме мјерења. Мјерени сигнали су на дијаграму означени истим бојама као у претходном примјеру, с тим што је сад плавом бојом означен сигнал за момент.



Слика 13. Временски дијаграм пуштања у рад СМСМ из Function generator-a

На дијаграму (Сл. 13) је приказан одзив мотора за задате улазне параметре. На дијаграму се види временска зависност струје, момента и брзине, која се мијења по синусном закону. Критична је промјена смјера обртања мотора, јер тада мотор кочи и наставља обртање у супротном смјеру. Тада долази до знатног повећања струје, које је праћено и наглом промјеном момента. За рад мотора је повољније да је временски период што дужи због спорије промјене струје.

VI. ЗАКЉУЧАК

У раду је описан поступак пуштања у рад синхроног мотора са сталним магнетима помоћу фреквентног

претварача *Siemens SINAMICS S120*. У лабораторији је постављен тестни електромоторни погон за практично испитивање рада електромоторног погона са синхроним мотором са сталним магнетима на ротору. У овом случају мотор стартује у синхронизму због тога што се промјеном фреквенције директно утиче на његову синхрону брзину која се мијења заједно са фреквенцијом, а то му омогућава регулација фреквенције преко фреквентног претварача. Управљање радом мотора преко фреквентног претварача из програма *Starter* је било корисно због испитивања електродинимичких оптерећења мотора, што је рађено задавањем времена рампи за достизање задате брзине приликом пуштања у рад. Мјерња су показала да је полазна струја и момент мотора, а самим тим и електродинимичко напрезање мотора, доста веће ако се не користе ове временске рампе.

У реализацији овога тестног погона коришћена је повратна веза између мотора и претварача преко енкодера. Енкодер омогућава повратну информацију контролеру о положају и брзини мотора, па се зато овај погон може искористити и као сервопогон.

ЗАХВАЛНИЦА

Испитивања у овом раду су рађена у склопу израде дипломског рада на првом циклусу академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Источној Сарајеву, под менторством доц.др Петра Матића и уз помоћ асистента мр Срђана Јокића.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Митраковић Бранко, „Синхроне машине“, Научна књига, Београд, 1986.
- [2] Марко Гечић, Дарко Марчетић, Владимир Катић, Ђура Орос, Петар Матић, „Преглед метода за оптимизацију губитака синхроних мотора са сталним магнетима“, ЕНЕФ 2013, Бања Лука, рр. В2(35- 39), 22. – 23. новембар 2013. године
- [3] Вукосавић Н.Слободан, „Дигитално управљање електричним погонима“, Академска мисао, Београд, 2003.
- [4] Вучковић Владан, „Електрични погони“, Академска мисао. Београд, 2002.
- [5] Вукосавић Н.Слободан, „Електричне машине“, Академска мисао, Београд, 2010.
- [6] Бузатов Снежана, Ристић Лепосава, „Упутство за рад са претварачем *Sinamics S120*“, ЕТФ Београд

ABSTRACT

This paper describes the construction and principle of operation of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) as well as its start-up without load on the shaft with changes in speed during operation. The speed control is regulated by a frequency converter *Siemens SINAMICS S120* using the *Starter* program. In the practical part, the marked electrical parameters for the given speed changes via the ramps of the *Function generator* have been recorded and the analysis of the results obtained has been given.

Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Mitar Grće