

ОДРЕЂИВАЊЕ ВРИЈЕДНОСТИ ПОДУЖНЕ И ПОПРЕЧНЕ ИНДУКТИВНОСТИ  
СИНХРОНЕ РЕЛУКТАНТНЕ МАШИНЕSYNCHRONOUS RELUCTANCE MACHINE DIRECT AND QUADRATURE  
INDUCTANCES VALUE DETERMINATION

Милан Беатовић, Драган Милићевић, Факултет техничких наука, Нови Сад

## Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА

**Кратак садржај** – Овај рад описује експерименталну процедуру одређивања подужне и попречне индуктивности синхроне релуктантне машине снаге 1.5 kW као неопходних параметара математичког модела и ефикасних алгоритама управљања.

**Кључне речи:** Синхрона релуктантна машина, Идентификација параметара, Индуктивност

**Abstract** – This paper describes the experimental procedure for direct and quadrature inductance determination of 1.5 kW synchronous reluctance machine as necessary parameters for mathematical model and efficient algorithms.

**Keywords:** Synchronous reluctance machine, Parameters identification, Inductance

## 1. УВОД

Релуктантне машине представљају најстарију врсту машина намијењену за електромеханичко претварање енергије, ротора дизајнираног на тај начин како би се постигла што већа разлика релуктансе кроз директну и попречну осу [1]. На основу начина напајања релуктантне машине се дијеле на прекидачке и оне синусно напајане тј. синхроне релуктантне машине (СРМ). У односу на асинхроне машине, СРМ одликује једноставније управљање услед недостатка клизања као промјењиве, док их у односу на синхроне машине са сталним магнетима заобилазе проблеми са демагнетизацијом и прегријавањем [2].

Ове машине одликује ниска цијена израде, недостатак ријетких материјала, висока ефикасност, значајна област константне снаге упоредљива са другим типовима машина, висока вриједност момента по амперу, добра ефикасност, тако да налазе примјену у транспортним системима, вентилаторима, пумпама, компресорима, лифтовима итд, будући да претварају енергетске електронике обезбјеђују високу ефикасност у режимима са привременом и перманентном оптерећеношћу чиме се намеће као достојна замена асинхроним машинама. Међутим, машине с овом изведбом имају недостатке у виду ниског фактора снаге који зависи од фактора истурености (однос подужне и попречне индуктивности) и високог степена зависности

## НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији је ментор био др Драган Милићевић, ванр. проф.

индуктивности од струје што усложњава алгоритме управљања и реализацију модела машине. Неопходне параметре електричних машина могуће је аквизирати нумеричким и аналитичким моделима попут методе коначних елемената и опитима у погонском и ванпогонском стању [3]. У даљем тексту биће описани мотиви и механизми за прикупљање претходно поменутих параметара.

## 2. ИНДУКТИВНОСТ МАШИНЕ КАО НЕОПХОДАН ПАРАМЕТАР

Математички модели у обртном  $dq$  координатном систему захтијевају познавање подужне и попречне индуктивности машине и њихове промјене уколико се ради о статичким или динамичким моделима – респективно. (1) представља матрични запис напонске једначине СРМ у обртном домену:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

Алгоритми управљања се ослањају на естимирани вриједности величина, попут електричног момента (2), те потражују тренутне вриједности индуктивности:

$$M_{el} = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2)$$

Претходно је споменуто да фактор снаге, самим тим и његова максимална вриједност зависе од фактора истурености што се може показати из (3), тако што повећање фактора истурености утиче на повећање фактора снаге:

$$IPF_{max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1}, \quad \xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (3)$$

Управљачки алгоритам МТРА (Maximum Torque Per Ampere) омогућује максимални момент за одређену вриједност струје и ослања се на минимизацију губитака у бакру промјеном струјног угла који кореспондира са вриједношћу потребног момента [4]. Вриједност струјног угла који се везује за МТРА износи  $45^\circ$ , те струјне референце износе (4,5):

$$i_{d\_ref} = \sqrt{\frac{2|M_{el\_ref}|}{3p(L_d - L_q)}} \quad (4)$$

$$i_{q\_ref} = i_{d\_ref} \text{sign}(M_{el\_ref}) \quad (5)$$

Како би се наведена стратегија могла примјенити потребно је познавати вриједности индуктивности у широком струјном дијапазону.

### 3. ОДРЕЂИВАЊЕ ПОДУЖНЕ И ПОПРЕЧНЕ ИНДУКТИВНОСТИ

Индуктивности синхроне релуктантне машине добијене су методом мјерења у ванпогонском стању помоћу лабораторијског претварача учестаности и побуђивањем машине аутотрансформатором чиме су створени услови за упоређивање добијених резултата прекидачким и мрежним напајањем. На слици 1. је приказана експериментална поставка при испитивању машине помоћу аутотрансформатора.



Слика 1. Експериментална поставка

#### 3.1. Одређивање $L_d$

За одређивање  $L_d$  потребно је поставити ротор тако да је подужна оса ротора колинеарна са фазом  $a$  кратким спајањем преостале двије фазе и прикључењем извора једносмјерне струје – позитивним крајем са фазом  $a$ , негативним са кратко спојене крајеве преосталих фаза. За жељене вриједности струје удешава се и мјери напон спајањем извора наизмјеничне струје на крајеве повезане као при паркирању ротора, те се прорачунава импеданса, затим реактанса (6):

$$Z_{fd} = \frac{2 U_{rms}}{3 I_{rms}}, X_d = \sqrt{Z_{fd}^2 - R_s^2} \quad (6)$$

Индуктивност  $L_d$  се изводи из следећег израза (7):

$$L_d = \frac{X_d}{2\pi f} \quad (7)$$

Одређивање индуктивности извршено је помоћу напонских извора различите учестаности, мрежноог напона амплитуде контролисана аутотрансформатором и лабораторијског претварача учестаности гдје је примјенјена синусна модулација и остварена учестаност напајања од 25 Hz, амплитуде такође контролисана аутотрансформатором [5].

#### 3.2. Одређивање $L_q$

Одређивање попречне индуктивности синхроне релуктантне машине врши се на исти начин као одређивање подужне, с тим што се ротор закључава у положај гдје је попречна оса ротора колинеарна фази  $a$ . Ротор прелази у овај положај побуђивањем машине извором једносмјерне струје прикључивањем његовог позитивног краја на крај фазе  $c$ , негативног на крај

фазе  $b$ . Извор напајања се спаја на исти начин као при мјерењу подужне индуктивности. На претходно поменути начин врши се прорачун импедансе и реактансе (8):

$$Z_{fq} = \frac{2 U_{rms}}{3 I_{rms}}, X_q = \sqrt{Z_{fq}^2 - R_s^2} \quad (8)$$

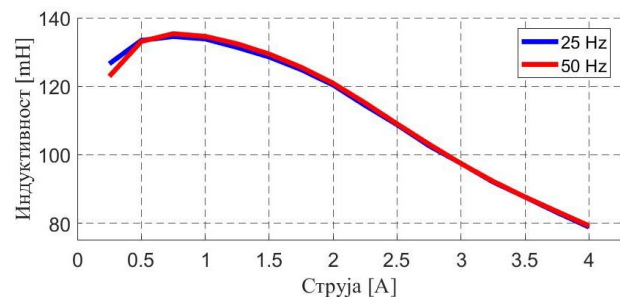
Индуктивност  $L_q$  се изводи из следећег израза (9):

$$L_q = \frac{X_q}{2\pi f} \quad (9)$$

Опити су вршени у 16 радних тачака након чега су реконструисане криве промјене индуктивности у зависности од струје машине. Због сложености експеримента, није одређена зависност појединих индуктивности од подужне и попречне компоненте струје, упркос снажној појави спрезања оса.

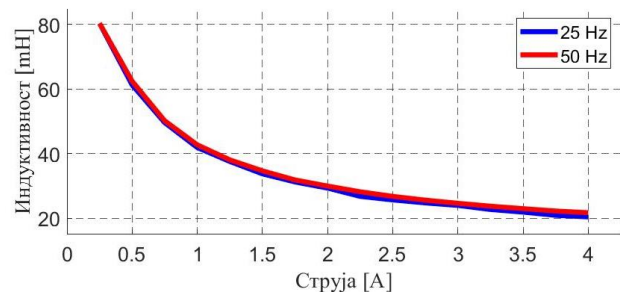
Плаве криве представљају промјену индуктивности у случајевима примјене претварача учестаности као побудног средства, док црвене када је примјенјен мрежни напон као побуда.

На слици 2. се примјетљује да се резултати добијени на два различита начина побуђивања врло мало разликују и могу бити посљедица несавршености мјерног инструмента, будући да је приликом напајања претварачем учестаности прекидачка учестаност износила 10 kHz.



Слика 2. Подужна индуктивност  $L_d$

На слици 3. приказана је промјена попречне индуктивности, за коју важе претходни коментари у вези са подужном индуктивношћу и једнаком тенденцијом промјене у случају коришћења оба побудна средства.

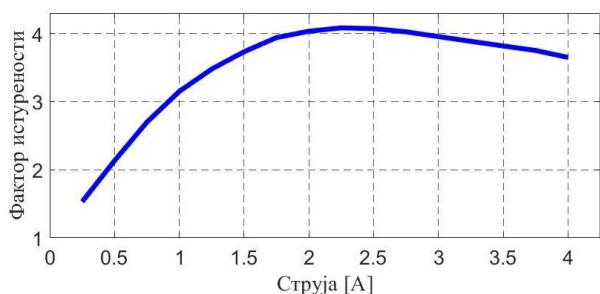


Слика 3. Попречна индуктивност  $L_q$

Значај фактора истурености у смислу утицаја на фактор снаге претходно је предочен, док се зависност електричног момента од фактора истурености огледа у једначини (10):

$$M_{el} = \frac{3}{2} p (\xi - 1) \left( \frac{E}{\omega L_d} \right)^2 \sin 2\delta \quad (10)$$

Са слике 4. могуће је уочити да фактор истурености за вриједности струје веће од 1.5 А одржава вриједност у уским границама што обезбјеђује област готово константног момента.



Слика 4. Промјена фактора истурености СРМ

Како би се доказала вјерност добијених резултата извршена је њихова успоредба са резултатима учитаним путем АМА-е (енгл. *Automatic Motor Adaptation*) индустријског претварача учестаности *Danfoss*. Упоредни резултати приказани су у табели 1. за тачку сатурације *POS* (енгл. *Point Of Saturation*) од 71% номиналне вриједности струје, гдје се коначан исход значајно не разликује.

Табела 1. Вриједности индуктивности у сатурацији

71% POS	$L_{d\_sat}$	$L_{q\_sat}$
<i>Danfoss</i>	105.103 mH	31.303 mH
Експеримент	102.556 mH	25.839 mH

#### 4. ЗАКЉУЧАК

Познавање вриједности подужне и попречне индуктивности синхроне релуктантне машине је један од фундаменталних услова за формирање модела машине и примјене сложених алгоритама управљања који ће обезбиједити високу ефикасност. С тим у вези, потребно је спровести један од предложених начина за аквизицију параметара.

Опит је показао да облик ексцитације не утиче на добијене резултате огледа одређивања индуктивности у ванпогонском стању, али и да се они значајно не разликују од параметара ажурираних индустријским претварачем учестаности.

Имплементација добијених резултата се може вршити уз помоћ *LUT*-а (енгл. *Look-Up Table*) у моделима и алгоритмима уз интерполацију вриједности добијених експериментом.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] K. Yahia, D. Matos, J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, "Modeling synchronous reluctance motors including saturation, iron losses and mechanical losses," *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2014, pp. 601-606, doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6871965.
- [2] L. Xu, X. Xu, T. A. Lipo and D. W. Novotny, "Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, no. 5, 1991.
- [3] H. Heidari *et al.*, "A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 729, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13020729.
- [4] M. N. Ibrahim, P. Sergeant and E. M. Rashad, "Synchronous reluctance motors performance based on different electrical steel grades," *2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*, 2015, pp. 1-1, doi: 10.1109/INTMAG.2015.7157234.
- [5] Darko P. Marčetić, „Mikroprocesorsko управљање енергетским претвараčима”, *Fakultet техничких наука у Новом Саду*, Novi Sad, 2014.

#### Кратка биографија:



**Милан Беатовић** рођен је у Требињу, Република Српска, Босна и Херцеговина, 1998. год. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Енергетска електроника и електричне машине одбранио је 2021.год.



**Драган Милићевић** рођен је у Тузли, СР Босна и Херцеговина 1977. године. Докторску дисертацију под називом „Развој напредног управљања погоном са шестофазним асиметричним асинхроним мотором” на Факултету техничких наука одбранио је 2014. год. Изабран је у звање ванредног професора 2019. год.