

ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ЕКВИВАЛЕНТНЕ ШЕМЕ АСИНХРОНОГ МОТОРА УПОТРЕБОМ СОФТВЕРСКИХ АЛАТА**DETERMINATION OF PARAMETERS OF EQUIVALENT CIRCUIT OF INDUCTION MOTOR USING SOFTWARE TOOLS**

Никола Поповић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – У овом раду поређене су стандардне методе добијања параметара еквивалентне шеме асинхронног мотора са методом одређивања параметара употребом софтверских алата. Као пример коришћен је асинхронни мотор називне снаге 11 kW.

Кључне речи: Асинхронна машина, еквивалентна шема, метода коначних елемената

Abstract – In this paper, standard methods of obtaining parameters of the equivalent circuit of an asynchronous motor were compared with a method of determining parameters using software tools. An asynchronous motor with a rated power of 11 kW was used as an example.

Keywords: Asynchronous Machine, Equivalent Circuit, Finite Element Method

1. УВОД

Асинхронна машина у савременој индустрији преставља најважнији уређај за извршење механичког рада.

Коришћење асинхроне машине је економски исплативо и оправдано, одржавање је јефтино, отпорна је на грубе манипулације и једноставна је за коришћење, поуздана је и сигурна током рада, није великих габарита. У примени најчешће се сусреће као трофазни мотори.

Еквивалентна шема асинхроне машине представља параметре машине који омогућавају одређивање стања машине. Стање машине зависи од улазних параметара као што су напон статора, момент оптерећења вратила, брзина обртања вратила итд. Еквивалентна шема асинхроне машине је струјно коло формирано од еквивалентнираних параметара сведених на једну фазу.

Познавање параметара еквивалентне шеме омогућава се одређивање статичких и динамичких карактеристика машине.

Стандардне методе за одређивање параметара еквивалентне шеме су нумеричка метода и експериментална метода.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дејан Јеркан.

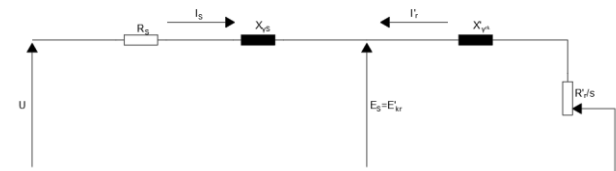
2. ФОРМИРАЊЕ ЕКВИВАЛЕНТНЕ ШЕМЕ АСИНХРОНЕ МАШИНЕ

Основ за добијање еквивалентне шеме представља пофазна представа асинхроне машине дата на следећој слици:



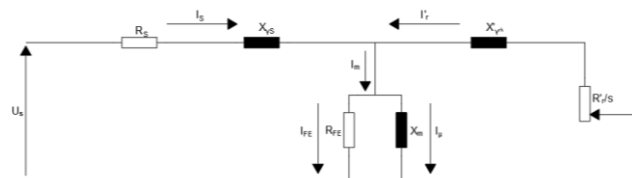
Слика 1. Пофазна представа асинхроне машине

Струјна кола приказана на претходној шеми су галвански одвојена, али постоји магнетна спрега између њих. Како би се добило еквивалентно коло неопходно је свести роторско струјно коло на статорско. Испитивањем специјалног случаја када је клизање $s=1$ у ком се машина понаша као трансформатор, може се доћи до следеће представе асинхроне машине:



Слика 2. Галвански повезана пофазна представа асинхроне машине

Изражавањем електромоторне силе статора преко струје магнећења и еквивалентирањем губитака у гвожђу машине омском отпорношћу може се одредити грана магнећења. Уврштавањем гране магнећења у еквивалентну шему добија се комплетна еквивалентна шема:



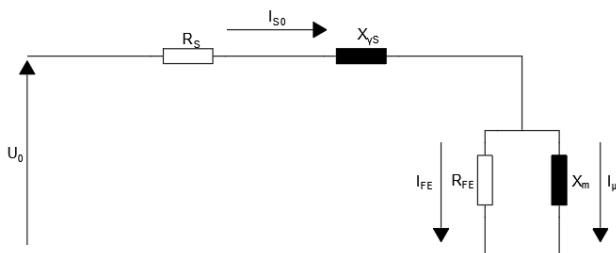
Слика 3. Комплетна еквивалентна шема асинхроне машине

3. НУМЕРИЧКА МЕТОДА ОДРЕЂИВАЊА ПАРАМЕТАРА ЕКВИВАЛЕНТНЕ ШЕМЕ

Нумеричка метода одређивања параметара кевивалентне шеме се своди на нумеричко одређивање параметара машине у току огледа кратког спојаи и празног хода. Комбинацијом добијених параметара се може добити комплетна еквивалентна шема.

3.1. Оглед празног хода

Празан ход асинхроне машине је оглед који подразумева да се на прикључке статора доводи номиналан напон, док се вратило ротора држи неоптерећеним. Уколико је вратило ротора неоптерећено тада ће и моменат оптерећења бити једнак нули што за последицу има следеће: $s=0$, $I_r=0$, $P_{gFEr}=0$. Сада се еквивалентна шема асинхроне машине у току огледа празног хода може приказати на следећи начин:



Слика 4. Шема асинхроне машине у режиму празног хода

Машину у празном ходу карактериши следеће једначине:

$$S_0 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0 = P_0 - jQ_0 \quad (1)$$

$$P_{gFE} = (P_0 - 3 \cdot R_s \cdot I_0^2) \cdot \frac{3}{4} \quad (2)$$

$$I_{FE} = I_0 \cos \varphi_0 \quad (3)$$

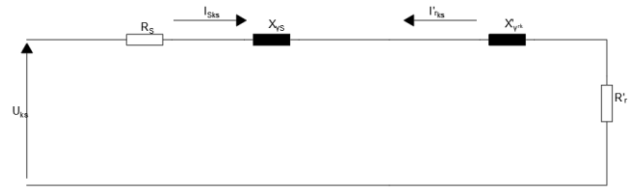
$$R_{FE} = \frac{P_{gFE}}{3 \cdot I_{FE}^2} \quad (4)$$

$$X_0 = \frac{Q_0}{3 \cdot I_0^2 \sin \varphi} \quad (5)$$

$$X_m = X_0 - X_{\gamma s} \quad (6)$$

3.2. Оглед кратког споја

Оглед кратког споја подразумева да се вратило ротора држи укоченим док се на прикључке статора доводи напон потребан за протицање номиналне струје у статору. Оглед кратког споја се изводи како би се одредили параметри редних грана статора и ротора еквивалентне шеме. Како је брзина обртања ротора једнака нули, клизање ће износити $s=1$. Ово за последицу има да ће статорска и роторска струја бити једнаке, па је из еквивалентне шеме могуће закључити да ће струја магнећења бити једнака нули, односно да је могуће занемарити грану магнећења. Еквивалентна шема огледа кратког споја се може исказати на следећи начин:



Слика 5. Шема асинхроне машине у режиму кратког споја

Машину у кратком споју карактеришу следеће једначине:

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_{ks} \cdot I_n = P_{ks} - jQ_{ks} \quad (7)$$

$$U_{ks} = \frac{I_n}{I_{start}} \cdot U_n \quad (8)$$

$$R_{ks} = R_s + R'_r \quad (9)$$

$$P_{ks} = 3 \cdot R_{ks} \cdot I_n^2 \quad (10)$$

$$X_{ks} = \sqrt{\frac{U_{ks}^2}{I_n^2} - R_{ks}^2} \quad (11)$$

За одређивање параметара X_{ks} и R_{ks} могуће је користити следеће апроксимације у случају недостатка података:

$$\begin{aligned} X_{\gamma s} &= X'_{\gamma r} = \frac{X_{ks}}{2}, \\ R_s &= R'_r \end{aligned} \quad (12)$$

4. ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ЕКВИВАЛЕНТНЕ ШЕМЕ УПОТРЕБОМ СОФТВЕРСКОГ АЛАТА

У претходно приказаном прорачунском поступку за добијање вредности параметара еквивалентне шеме улазни подаци су били струја и напон статора, брзина обртања вратила и фактор снаге. У програмском алату *FEMM* улазни подаци су вредности струја по фази у посматраном моменту, фреквенција и број намотаја по фази.

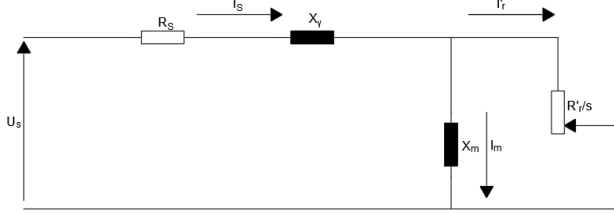
Програмски алат *FEMM* користи геометрију машине и магнетне особине материјала појединачних делова како би израчунао утицај магнетног поља произведеног од стране постојећих струја.

Након извршене симулације програм омогућава анализирање података. Међу подацима који се могу добити као резултат симулације налазе се напон, отпорност, струја, вектор јачине магнетног поља,... *FEMM* ради по принципу методе коначних елемената. Метода коначних елемената је метод нумеричког решавања диференцијалних једначина.

Принцип решавања једначина се своди на поделуи проблема на мање подјединице зване коначни елементи.

Решења једначина добијају се извођењем једначина за све подјединице, коначне елементе, а затим израчунавањем свих добијених једначина у целокупном систему и апроксимацијом непознатих величина.

За одређивање појединих параметара еквивалентне шеме је неопходно прво извести адекватан математички модел. За извођење математичког модела користиће се следећа еквивалентна шема:



Слика 6. Г-шема асинхроне машине

Из приказане еквивалентне шеме се може доћи до следећих израза:

$$X_{\mu} = \omega M \quad (13)$$

$$R'_r = \frac{M}{\tau} \quad (14)$$

$$L_{\gamma} = L_R - \frac{M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \quad (15)$$

$$X_{\gamma} = \omega L_{\gamma} = 2\pi f L_{\gamma} \quad (16)$$

$$L_s = \left(L_{\gamma} + \frac{M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) - j \left(\frac{\tau\omega_s M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (17)$$

$$M_{meh} = 3pMi_s^2 \left(\frac{j\tau\omega_s}{1 + (j\tau\omega_s)^2} \right) \quad (18)$$

4.1. Израчунавање вредности у FEMM-у

Претходно добијени израз за укупну индуктивност статорског намотаја се може поделити на реалан и имагинаран део. На тај начин добијају се две једначине са три непознате. Те две једначине гласе:

$$Re[L_s] = L_R = L_{\gamma} + \frac{M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \quad (19)$$

$$Im[L_s] = L_I = - \frac{\tau\omega_s M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \quad (20)$$

Решавање наведених једначина ће се вршити методом најмањих квадрата. Метода најмањих квадрата је поступак који се користи у регресивној анализи. Метода се своди на одређивање криве која приближно задовољава сва решења, уз критеријум провере да је квадратна вредност разлике података и апроксимираних вредности на криви најмања. Како би се метода најмањих квадрата могла применити на горе задате вредности, неопходно је прво прилагодити добијене једначине. Прво ће се увести нове променљиве ради олакшавања записа:

$$c_1 = \tau M \quad (21)$$

$$c_2 = \tau^2 \quad (22)$$

Сада се претходни израз може записати као:

$$\omega_s c_1 + L_i \omega_s^2 c_2 = -L_I \quad (23)$$

Могуће је увести матрични запис претходног израза како би се представила различита решења добијена за различите кружне брзине клизања:

$$m = \begin{bmatrix} \omega_{s1} & L_{I1}\omega_{s1}^2 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{sk} & L_{Ik}\omega_{sk}^2 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -L_{I1} \\ \vdots \\ -L_{Ik} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$m \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = b$$

Сада се добијени проблем може изразити на следећи начин:

$$m^T m \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = m^T b \quad (24)$$

Решење приказаног проблема ће бити:

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = (m^T m)^{-1} m^T b \quad (25)$$

Решење реалног дела укупне индуктивности статорског намотаја је сада могуће одредити на следећи начин:

$$L_{\gamma} = L_R - \frac{M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \quad (26)$$

Захваљујући вредностима М и τ одређених у претходним корацима могуће је одредити вредност L_{γ} израчунавањем средње вредности:

$$L_{\gamma} = \frac{\sum_{k=1}^k L_{\gamma k}}{k} \quad (27)$$

5. СТУДИЈА СЛУЧАЈА СНАГЕ 11 kW

Рађења је студија случаја кавезне асинхроне машине снаге 11 kW са различитим навојним кораком секције. Асинхрони мотор чији ће параметри бити одређивани у наставку рада има следеће називне податке:

- Номинална снага $S_n = 11 \text{ kW}$
- Номинална брзина $n_n = 1440 \text{ o/min}$
- Номинални напон $U_n = 400 \text{ V}$
- Номинална фреквенција напона $f_n = 50 \text{ Hz}$
- Номинална линијска струја $I_n = 22 \text{ A}$

Пре него што се претходно описане методе примене на наведену машину, неопходно је кориговати улазне податке. Претпоставићемо да ће статорски намотај описане машине бити повезан у троугао. У даљем тексту ће се користити ознака f за фазну струју. Уколико је та ознака изостављена, ради се о линијској струји. Из номиналне брзине обртања можемо закључити да се ради о четворополној машини.

5.1. Параметри одређени употребом нумеричке методе

Применом претходно описаних оледа, нумеричком методом су одређени следеће вредности параметара еквивалентне шеме, дате у Табели 1.

Табела 1. Параметри еквивалентне шеме

R_s	1,34965 Ω
R'_r	1,34965 Ω
R_{FE}	570,549 Ω
$L_{\gamma s}$	0,00573 H
$L'_{\gamma r}$	0,00573 H
M	0,18262 H

5.2. Параметри еквивалентне шеме одређене употребом софтверског алата FEMM

За примењивање методе коначних елемената неопходно је познавати физичке карактеристике машине. Претпостављена дубина машине је 205 mm. Ротор машине је кавезног типа, што значи да су сви намотаји кратко спојени. Статор машине садржи 36 жлебова подељених на два дела. У један жлеб се поставља 26 навојака. Проводници статора су бакарни, док је кавез ротора од алуминијума. Језгро статора и ротора чини челик. Између статора и ротора се налази ваздушни процеп. На следећој слици приказан је део модела из софтверског алата FEMM на ком се види распоред материјала на моделу мотора.

За вредности статорских струја одабрана је номинална вредност амплитуде фазне струје. Проблем је симулиран са различитим фреквенцијама клизања да би се дошло до довољно прецизних резултата. Коришћене су вредности фреквенције клизања која износе од 0,25 до 3 Hz са кораком од 0,25 Hz.

Применом претходно описаног поступка, овом методом су одређени следеће вредности параметара еквивалентне шеме, приказане у Табели 2.

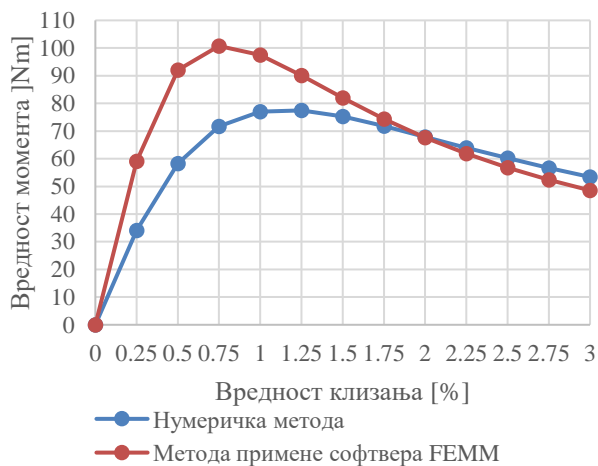
Табела 2. Параметри Г еквивалентне шеме

R'_r	1,00858 Ω
$L_{\gamma s}$	0,00779 H
$L'_{\gamma r}$	0,00779 H
M	0,20829 H

Приликом одређивања модела употребом ове методе изостављају се фактори отпорности статора и отпорности гране магнетне.

5.3. Поређење моментних карактеристика добијених различитим методама

Моментне карактеристике одређена употребом параметара добијених применом претходно описаних метода су приказане на следећем графику:



Слика 7. Упоредни приказ резултата

Називни моменат за описану машину се јавља при клизању од 2%. Са графика се може прочитати да се добија приближно једнака вредност момента за

називно клизање. Вредност превалног момента добијене приликом употребе методе примене софтверског алата FEMM (100 Nm) одступа од превалног момента добијеног применом нумеричке методе (80 Nm). Такође се може приметити да се вредност превалног клизања разликује за две поменуте методе (0,75% и 1%).

6. ЗАКЉУЧАК

На основу добијених резултата може се закључити да вредности добијене употребом обе методе дају релативно сличне резултате називног момента, као и да се моментне карактеристике подударају за вредности клизања блиске називном клизању. Одабир методе би требао да зависи од расположивих података о машини. Примењено је да су вредности превалног момента и превалног клизања различите за две методе, као и да се параметри еквивалентне шеме разликују. Одступања између резултата потичу од апроксимација и занемарења примењених у обе методе. Закључује се да је за прецизнију анализу података и проверу исправности метода неопходно познавати више карактеристика машине, или извршити испитивање машине и поредити добијене вредности наведених метода са стварним вредностима.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Веран Васић, „Скрипта увод у електричне машине“, Нови Сад 2021.
- [2] Бранко Митраковић, Никола Ј. Николић, „Асинхроне машине“, Научна књига, Београд, 1991.
- [3] Емил Леви, Владан Вучковић, Владимир Стрезорски, „Основи електроенергетике – Електроенергетски претварачи“, ФТН Издаваштво, Нови Сад, 2013.
- [4] Веран Васић, Борис Думнић, „Електроенергетски претварачи“, ФТН Издаваштво, Нови Сад, 2022.
- [5] Слободан Н. Вукосавић, „Електричне машине“, Академска мисао, Београд, 2010.
- [6] Веран Васић, „Електричне машине 2“, материјал са предавања, Факултет техничких наука у Новом Саду.

Кратка биографија:

Никола Поповић је рођен 1998. године у Новом Саду. Основне студије је успешно завршио на Факултету техничких наука у Новом Саду, из Електротехнике и рачунарства, на усмерењу Електричне машине и енергетска електроника.

контакт: 98.nikola@gmail.com