



УТИЦАЈ КОНСТРУКЦИЈЕ РОТОРА НА ПЕРФОРМАНСЕ КАВЕЗНИХ АСИНХРОНИХ МОТОРА

THE INFLUENCE OF ROTOR CONSTRUCTION ON PERFORMANCE OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS

Данило Лајшић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – У овом раду су представљене разлике параметара једнокавезног и двокавезног асинхроног мотора. Обрађен је аналитички прорачун за поменуте типове мотора, као и графички приказ резултата. На основу добијених резултата је извршена упоредна анализа перформанси мотора, како би се представио утицај конструкције ротора на карактеристике, у складу са променом облика жлеба. Представљене су предности и мане два типа ротора, као и њихова примена.

Кључне речи: Једнокавезни и двокавезни асинхрони мотори, конструкција ротора, перформансе мотора

Abstract – This paper presents differences between parameters of single-cage and double-cage rotors of induction motors. Analytical calculations for the mentioned two types of motors were conducted, as well as the graphical representation of obtained results. A comparative analysis of obtained results was performed, in order to present the influence of rotor construction on the performance, in accordance with the change in slots shapes. The advantages and disadvantages of the two types of rotors are presented, as well as their application.

Keywords: Single-cage and double-cage induction motors, rotor construction, motor performance

1. УВОД

Нагли развој и напредак човечанства се заснива на чињеници да је пронађен начин претварања енергије ускладиштене у природи у користан механички рад. Механички рад је основа продуктивности људског друштва. Енергетски претварачи су направе које претварају један вид енергије у други, међу којима су најбитнији обртни енергетски претварачи.

Због своје једноставности и економичности, асинхроне машине преузимају велики удео као погонски мотори у индустрији, пољопривреди, домаћинствима и сл. Мањи моменат инерције, поузданост и сигурност у раду су додатно допринели широј примени асинхроних машина, а најчешће се употребљавају у моторском режиму рада и то у трофазној изведби [1]. Од времена проналаска, па до данас, стално се ради на усавршавању асинхроних мотора.

НАПОМЕНА:

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

Због широке примене, асинхрони мотори се у многоме разликују, а њихова конструкција зависи од услова под којима раде, врсте погона, начина њиховог покретања, номинланих параметара и др. Циљ овог рада је да се упореде перформансе за различите облике жлебова ротора, како би се добио јасан увид утицаја облика жлеба и њених проводника на излазне карактеристике асинхроних мотора, при чему конструкција статора остаје непромењена. Као предмет анализе су узета два мотора, једнокавезног и двокавезног типа ротора.

2. ЕЛЕКТОРМЕХАНИЧКО ПРЕТВАРАЊЕ ЕНЕРГИЈЕ

Електричне машине су енергетски претварачи који претварају електричну енергију у механички рад или врше конверзију механичког рада у електричну енергију. Ово електромеханичко претварање енергије се заснива на спрежном (електромагнетном) пољу, које делује на струјна кола и покретне делове машине.

На проводнике и феромагнетике у спрежном пољу делују електромагнетне силе, док у струјним колима, промене флукса узрокују индуковање електромоторних сила [2]. Претварање енергије у обртним електричним машинама је засновано на следећим основним физичким принципима: Лоренцова сила, Фарадејев закон електромагнетне индукције, Амперов закон, као и Кирхофови закони.

2.1. Обртно поље

Асинхрони мотори већих снага су углавном у трофазној изведби. У фазним намотајима мотора се, приликом повезивања на трофазну мрежу, успостављају наизменичне струје, стварајући вектор магнетопобудне силе (МПС) у правцу осе намотаја, а амплитуда ове силе је зависна од струја. Амплитуда магнетопобудне силе фазног намотаја мења се по ободу зазора у функцији времена, због простопериодичне промене струје.

Резултантна магнетопобудна сила се добија као збир три пофазне магнетопобудне силе, а има константну амплитуду и ротира у простору синхроним брзином ω . Овој обртној сили одговара и обртно поље, познатије као Теслино обртно поље [3].

С обзиром да се кроз све три фазе статорског намотаја успостављају наизменичне, фазно померене струје, оне узрокују резултантну магнетопобудну силу у зазору, која се понаша као да је настала од сталних магнета.

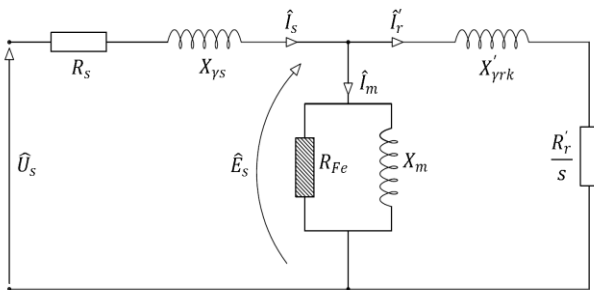
2.2. Губици асинхроних мотора

При претварању механичке енергије у електричну, и обрнуто, јављају се нежељени губици енергије. Губици представљају изгубљени део снаге, који се манифестују у виду топлоте, што доприноси загревању машина. Поред тога, са појавом ових нежељених ефеката, смањује се и ефикасност машине, односно степен искоришћења. Приликом конструисања машина, тежи се да се губици што више смање, како би се ефикасност повећала.

2.3. Заменско коло и моменат конверзије

Ради лакшег моделовања, асинхроне машине се могу представити заменским колом. За устаљена стања, заменско коло се може одредити аналогно трофазном трансформатору, при чему је статор представљен као примар трансформатора, а ротор је у улози кратко спојеног секундара.

Усвајајући једначине напонских равнотежа статорског и роторског кола, долази се до приказа заменског кола, датог на слици 1, на основу којег се даље могу одредити законитости које карактеришу асинхроне моторе.



Слика 1 – Заменско коло асинхроног мотора

Услед успостављања роторске струје, у садејству са обртним магнетним пољем, ствара се обртни моменат мотора, који покреће ротор у смеру поља. Снага пренета електромагнетним путем на ротор се исказује снагом обртног поља, а представља снагу која се преноси кроз ваздушни зазор машине на ротор. Крајња механичка снага се добија тек када се уваже механички губици и губици активне снаге ротора [3], па се сходно наведеном долази до коначног израза (1) за моменат конверзије:

$$m_c = \frac{3 \cdot p}{2\pi f_s} U_s^2 \frac{\frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + \sigma_1 \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{ys} + \sigma_1 X'_{yrk}\right)^2} \quad (1)$$

3. РАСИПНЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ОТПОРНОСТИ АСИНХРОНИХ МОТОРА

Током рада електричне машине долази до успостављања магнетног поља, које се описује помоћу магнетног флуksа. Познато је да укупни флуks не учествује у потпуности у корисној конверзији, већ се јављају и компоненте флуksа које обухватају само статорске, као и компоненте које захватају само роторске намоте. Ове компоненте флуksа су познате као флуks расипања, а са њиховом појавом у машини се успостављају веће вредности струје магнетног поља. Расипни флуks се обично сматра негативним феноменом у раду асинхроног мотора, али има важну улогу у ограничавању полазних струја, као и утицај на моментну карактеристику.

Расипни флуks статора и ротора се представља у облику укупне индуктивности расипања, која представља суму индуктивности расипања зазора машине, расипне индуктивности жлеба, индуктивности расипања зубаца, као и крајева намотаја и расипна индуктивност настала услед закошења роторских жлебова [4,5]. Облик жлеба има значајан утицај на флуks расипања, јер је магнетна отпорност, на коју наилази овај флуks, зависна од геометрије жлеба. Приликом одређивања расипних реактанси статора и ротора, облик жлеба утиче на подужну магнетну проводност.

Кавезни ротори у својим жлебовима имају један проводник (или два у случају двокавезне конструкције), чија висина битно утиче на расипне индуктивности машине, као и на појаву ефекта потискивања струје. Наиме, приликом успостављања струје ротора, флуks расипања пролази кроз жлебове и затвара се кроз зупце и јарам магнетног кола ротора. Делови проводника ротора при дну жлеба су захваћени са већом густином линија флуksа расипања, у поређењу са вишим сегментима, услед чега импеданса расипања проводника опада према врху. Индуктивност делова проводника који се налазе ближе отвору жлеба је мања, те наизменична струја има тенденцију да се успоставља у деловима проводника обухваћеним са мањим расипним флуksом. Услед потискивања наизменичне струје, отпорност проводника је нешто већа него у случају успостављања једносмерне струје. Под оваквим условима, густина струје расте од дна према отвору жлеба ротора. Ефекат потискивања је зависан од фреквенције струје, па је најизраженији приликом старта мотора, јер је тада фреквенција роторске струје једнака фреквенцији напајања, а линеарно опада са повећањем брзине обртања ротора. Услед већих расипних импеданси дубљих делова штапова, струја се потискује ка врху жлеба, те један део проводника остаје неискоришћен. Како је струја ротора при покретању сконцентрисана на мањем попречном пресеку проводника, отпорност закоченог ротора је знатно већа [2,4,5]. Последица ефекта је мања полазна струја мотора, као и већи полазни моменат. Овај ефекат је израженији код проводника веће висине.

Мале реактансе расипања резултују ка већим вредностима полазних струја. Јасно је да је у интересу да ове струје буду што мање. Сходно зависности полазне струје од индуктивности расипања, ова струја се може умањити увећањем расипних индуктивности. Међутим, како је и превални (максимални) моменат зависан од расипних индуктивности, тако ће се овим поступком умањити његова вредност, па је неопходно наћи решење које ће бити прихватљиво по оба параметра. Иако увећање расипних реактанси позитивно утиче на вредности струје покретања, повољнија ситуација је да ове реактансе буду мање, јер се на тај начин добија већи фактор снаге, као и мањи падови напона.

Карактеристике асинхроних мотора указују да је при пуном оптерећењу клизање знатно мање за мотор са мањом еквивалентном отпорношћу. Ефикасност ротора је одређена релацијом клизања (1-s), па је предност

мањег активног отпора ротора и већа ефикасност [6]. Међутим, мале отпорности имају и неке недостатке. Полазни моменат је зависан од отпорности ротора, па се за мале вредности активног отпора добија смањен полазни моменат. Ниска вредност полазног момента може означити да оптерећење не може да се покрене из стања мировања. Једна битна мана нискоотпорних ротора су и високе полазне струје, које могу да доведу до великих падова напона у мрежи. Променом отпорности роторских намотаја, готово да не утичемо на максимални (превални) моменат, али је превално клизање директно пропорционално роторској отпорности.

Пожељно је да мотор при старту и при малим брзинама има већу отпорност ротора, док је ниска отпорност пожељна при номиналним брзинама. Да би се остварила оба ефекта, неопходно је да се омогући промена отпорности ротора од тренутка покретања мотора до достизања номиналне брзине. Ако се у обзир узму само кавезни мотори који се покрећу директним прикључењем на трофазну мрежу, ефекат промене отпорности се може постићи са конструисањем ротора у двокавезној изведби или са дубоким жлебовима на ротору. Код оваквих типова жлебова је израженији ефекат потискивања струје, па самим тим и промена отпорности.

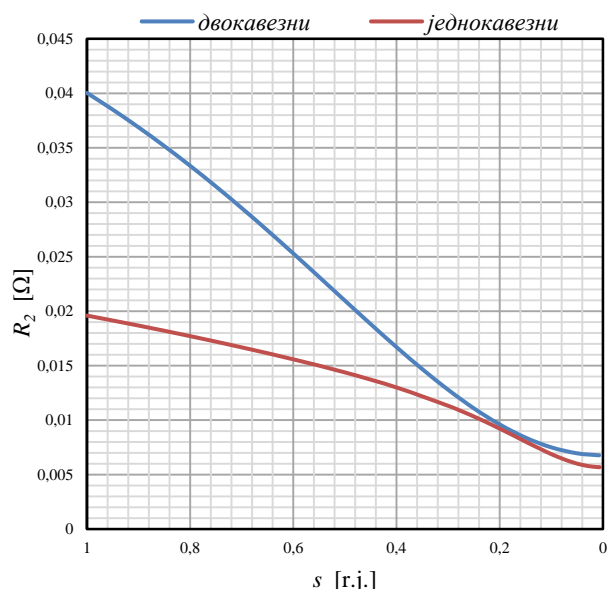
4. УПОРЕДНА АНАЛИЗА ДВОКАВЕЗНОГ И ЈЕДНОКАВЕЗНОГ АСИНХРОНОГ МОТОРА

Као предмет анализе је узет четворополни, асинхронни мотор, осне висине 355mm, затвореног типа кућишта, са сопственом вентилацијом. Примењена је анализа мотора при употреби једнокавезног и двокавезног ротора, како би се јасно истакле разлике у перформансама. Приликом прорачунавања параметара је усвојено да је конструкција статора идентична за поменута два типа мотора. Једнокавезни ротор је сачињен од правоугаоних бакарних проводника, док је двокавезни тип изведен са месинганим штаповима у спољашњем делу жлеба ротора, а у дубље отворе жлебова су смештени бакарни штапови.

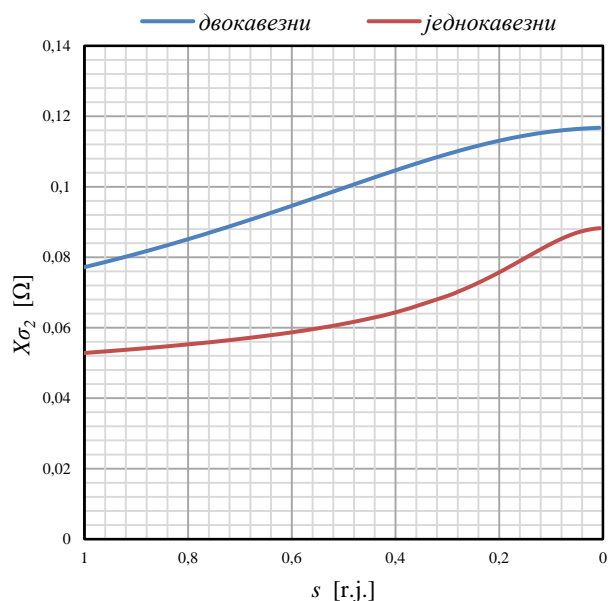
Као последица ефекта потискивања струја у проводницима ротора, изражено је повећање омске отпорности роторског кола асинхронног мотора приликом његовог упуштања у рад. Ефекат потискивања струја је доминантнији за случај двокавезног ротора, те је повећање роторске отпорности приликом стартовања мотора израженије. Струја током покретања двокавезног ротора је сконцентрисана у месинганим проводницима, који због природе материјала доприносе додатном повећању омске отпорности роторског кола.

Иако је укупна ефективна површина роторских проводника двокавезног мотора већа, омска отпорност при покретању је израженија. Слика 2 и 3 илуструју омске и индуктивне отпорности два ротора за различите вредности клизања.

Зависно од типа погона, мотор се конструише да његова моментна карактеристика у свим тачкама буде изнад криве момента терета који покреће, све до постизања номиналне вредности брзине. Са повећањем активне отпорности ротора, полазни моменат добија већу вредност.



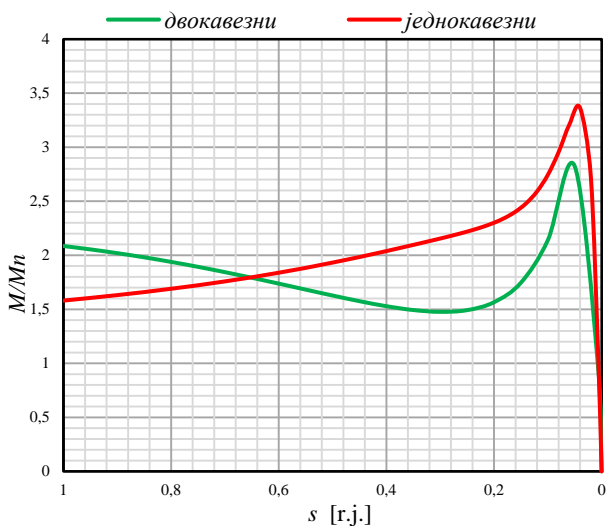
Слика 2 – Омске отпорности ротора једнокавезног и двокавезног мотора за различите вредности клизања



Слика 3 – Индуктивне отпорности ротора једнокавезног и двокавезног мотора за различите вредности клизања

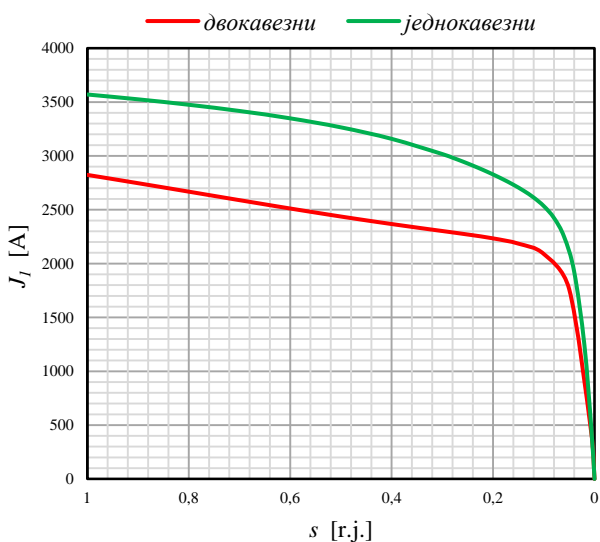
Како је омска отпорност закоченог ротора већа код двокавезног мотора, очекивано је и да је полазни моменат већи за овај случај. Мање вредности индуктивног отпора су својствени за једнокавезни мотор, које директно условљавају висину превалне тачке на моментној карактеристици. Што се тиче развијеног момента мотора, јасно је да је предност двокавезног мотора када је реч о полазном моменту, док је превални моменат умањен. На слици 4 су представљене криве момента у функцији клизања.

Струје покретања мотора представљају значајан проблем, јер могу да достигну вредности чак и до десет пута веће од номиналних. С обзиром да је укупна сведена омска отпорност при кратком споју знатно мања од индуктивне, на струју покретања у највећој мери утичу укупне реактансе.



Слика 4 – Моментне карактеристике мотора у функцији клизања

Са циљем сузбијања великих вредности полазних струја, повећање вредности расипних индуктивности је нашло позитивну примену. Двокавезне роторе, дакле, карактеришу мање вредности полазних струја, што је уочљиво на слици 5.



Слика 5 – Струје мотора у функцији клизања

Облик жлеба има битан утицај на вредности магнетних индукција мотора. Мање ширине јарма и зубаца ротора двокавезног мотора условљавају повећане вредности индукција ових делова машине. Самим тим је потребан већи удео магнетопобудне силе за успостављање поља, па је код двокавезног мотора потребна и већа струја магнећења кола.

Код мотора са двокавезним ротором успоставља се струја са већим уделом реактивне компоненте, па је сходно томе фактор снаге у номиналном режиму рада већи код једнокавезног мотора.

5. ЗАКЉУЧАК

Код асинхроних мотора намењених за директно покретање је неопходно да се познају моменти оптерећења погона који мотор покреће, јер је тиме директно условљена конструкција ротора. Моментна карактеристика мотора мора да буде изнад свих тачака момента оптерећења, све док се не достигне устаљен режим рада.

Дубље проводнике ротора, као и двокавезни начин извођења мотора, карактерише израженији ефекат потискивања струје, чиме се циљано повећавају омске отпорности роторског кола. Као последица потискивања струја се добијају повећање вредности полазних момента и смањење струја покретања, али, као негативна страна, смањују се фактор снаге и максимални моменат. Аналитичким прорачуном су потврђене теоретски изложене разлике једнокавезног и двокавезног асинхроног мотора, па је оправдана употреба двокавезног мотора за потребе повишених вредности полазних момената, као и смањене вредности полазних струја. Када у погону нису потребне веће вредности полазних момената, углавном се прибегава једнокавезном начину конструисања ротора, због постизања бољег фактора снаге, мање номиналне струје, али и стабилније моментне криве за устаљена стања. Поред наведеног, економичност израде мотора је предност једнокавезног типа ротора.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жокеф Варга, „Електричне машине II“, Суботица, 2006.
- [2] Слободан Н. Вукосавић, „Електричне машине“, Београд, 2010.
- [3] Емил Леви, Владан Вучковић, Владимир Стрезоски, „Основи електроенергетике – Електроенергетски претварачи“, Нови Сад, 2013.
- [4] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, „Design of Rotating Electrical Machines“, 2008.
- [5] Ion Boldea, Syed A. Nasar, „The Induction Machines Design Handbook“-second edition, 2010.
- [6] Austin Hughes, „Electric Motors and Drives“-third edition, 2006.

Кратка биографија:



Данило Лајшић је рођен 1994. године у Суботици. Основне студије завршио је на Факултету техничких наука 2018. године из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи. Мастер рад на истом факултету из области Електротехнике и рачунарства - Енергетска електроника и електричне машине одбранио је 2020. године.