

**УТИЦАЈ КАПАЦИТЕТА КОНДЕНЗАТОРА ИНВЕРТОРА НА РАД ВЕКТОРСКИ
УПРАВЉАНЕ АСИНХРОНЕ МАШИНЕ ПРИ РАЗЛИЧИТИМ ВРСТАМА ТЕРЕТА
DC BUS CAPACITANCE INFLUENCE ON THE VECTOR-CONTROLLED INDUCTION
MACHINE DRIVE WITH THE DIFFERENT TYPE OF THE LOAD**

Амар Хајдарпашић, Драган Милићевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – У овом раду испитује се утицај капацитета кондензатора у једносмерном међуколу инвертора на рад векторски управљаног трофазног кавезног асинхроног мотора. Теоретски и експериментално је анализиран рад претварача при различитим врстама терета када се користе кондензатори мање капацитивности од прорачунате оптималне вредности.

Кратак садржај: Трофазни кавезни асинхронни мотор, векторско управљање, једносмерно међуколо, кондензатор, оптерећење

Abstract – The paper examines the influence of the inverter DC link capacitor value on the operation of the vector-controlled induction machine drive. The operation of the inverter with the value of the DC Bus capacitor smaller than the optimal is analyzed theoretically and experimentally. Different types of loading are used throughout the experiments.

Keywords: Induction machine, vector control, DC bus, capacitor, loading

1. УВОД

Развојем компоненти енергетске електронике омогућене су боље перформансе инвертоског претварача који служи за напајање асинхроног кавезног мотора. Модерне прекидачке компоненте које се налазе у инвертоском претварачу данас имају бољи однос снаге и величине. Такође, фреквенција рада се значајно повећала што директно утиче и на остале компоненте које чине један претварач енергетске електронике.

Што се контроле асинхронних машина тиче као индустријски стандард данас су усвојене две технике, У/ф управљање и векторско управљање. Векторско управљање је сложеније од У/ф управљања, али омогућује много бољу контролу асинхронне машине побољшавајући динамику, доступност, поузданост, робустност и животни век погона.

Уколико се пажња обрати на унапређења пасивних компоненти енергетске електронике и овде се може констатовати напредак и увођење нових решења. Развој филм кондензатора са бољим карактеристикама у односу на широко прихваћени електролит-

ски кондензатор је директно довео до продужења животног века и употребљивости претварача.

Ако се зна да цена претварача енергетске електронике значајно зависи од величине кондензатора који је употребљен у једносмерном међуколу, при чему овај аспект не треба посматрати само кроз аспект цене кондензатора него и кроз аспекте увећања димензија, те проблематике хлађења, продужења животног века и поузданости, питање исправног димензионисања кондензатора и питање утицаја његове вредности на рад претварача постаје изузетно битно.

Управо питање оптимизације и утицаја вредности кондензатора у једносмерном међуколу јесте тема овог дипломског рада. У раду је експериментално утврђен утицај овог аспекта при чему је експериментално проверен утицај правилног избора капацитета кондензатора у једносмерном међуколу инвертора на рад векторски управљаног трофазног асинхроног мотора.

2. ПРОРАЧУН ОПТИМАНОГ КАПАЦИТЕТА КОНДЕНЗАТОРА

За прорачун оптималног капацитета кондензатора трофазног мосног претварача управљаног по SVM (енг. *Space Vector Modulation*) модулативној техници и са класичним трофазним диодним мостом на улазу, потребно је у корелацију довести неколико битних параметара самог претварача, напојне мреже и карактеристика машине која се из претварача напаја узимајући у обзир и начин како се машина током рада оптерећује. Параметари који при овоме фигуришу су максимални напон у једносмерном међуколу, максималну дозвољену таласност напона у једносмерном међуколу, учестаност пуњења и пражњења кондензатора, снага оптерећења у једносмерном међуколу, односно снага машине који се напаја преко претварача.

Максимални напон у једносмерном међуколу се прорачунава на основу израза (1)

$$U_{DCmax} = \sqrt{2} * U_{mreže} \quad (1)$$

где је:

- U_{DCmax} – максимална вредност напона у једносмерном међуколу,
- $U_{mreže}$ – међуфазни напон на улазу диодног исправљача.

НАПОМЕНА:

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

Када се прорачуна U_{DCmax} и одреде све горе наведене величине потребне за прорачун оптималног

капацитета кондензатора, онда се на основу израза (2) може прорачунати оптимални капацитет кондензатора за жељени претварач [1].

$$C = \frac{P_{n,motora}}{\Delta U_{DC} * \left(U_{DCmax} - \frac{\Delta U_{DC}}{2} \right) * 6 * f_{mreze}} \quad (2)$$

Где је:

- $P_{n,motora}$ – номинална снага мотора
- ΔU_{DC} – таласност напона у једносмерном међуколу за номиналне услове
- f_{mreze} - номинална фреквенција мреже

Када се одреди капацитет оптималног кондензатора, потребно је израчунати време пуњења (4) и пражњења кондензатора (5).

$$U_{DCmin} = U_{DCmax} - \Delta U_{DC} \quad (3)$$

$$T_C = \frac{\arccos\left(\frac{U_{DCmin}}{U_{DCmax}}\right)}{2\pi * 6 * f_{mreze}} \quad (4)$$

$$T_{DC} = \frac{1}{6 * f_{mreze}} - T_C \quad (5)$$

где је

- T_C – време пуњења кондензатора,
- T_{DC} – време пражњења кондензатора,
- U_{DCmin} – минимална вредност напона у једносмерном међуколу

Када се одреди време пуњења и пражњења кондензатора, онда се може одредити струја пуњења кондензатора (6) и ефективна вредност струје пуњења кондензатора (7), као и струја пражњења (8) и ефективна вредност струје пражњења кондензатора (9) [3].

$$I_C = C * \frac{dU_{DC}}{dT_C} \quad (6)$$

$$I_{Cef} = \sqrt{I_C^2 * T_C * 6 * f_{mreze}} \quad (7)$$

$$I_{DC} = C * \frac{dU_{DC}}{dT_{DC}} \quad (8)$$

$$I_{DCef} = \sqrt{I_{DC}^2 * T_{DC} * 6 * f_{mreze}} \quad (9)$$

где је:

- dU_{DC} – Разлика максималне и минималне вредности напона у једносмерном међуколу у тренутку посматрања.

За поставку коју чини асинхрона машина 0,75 kW, 1375 обр/мин, улазни напон исправљача 230 V, при 50 Hz, дозвољену таласност напона 10% прорачунат је оптимални кондензатор на основу израза (2) где се добија да је оптимална вредност капацитивности кондензатора $C_{DC}=249 \mu F$.

3. ЕКСПЕРИМЕНТ

3.1. Опис експерименталне поставке

За реализацију векторског управљања асинхронном машинном реализован је претварача учестаности чију основу чини развојни систем Texas Instruments LAUNCHXL-F28379D. Претварач је реализован као класичан трофазни IGBT мост, при чему се за мерење струје и напона користе LEM сонде. Трофазни диодни исправљач заједно са електролитским кондензаторима

је постављен тако да буде лако доступан за све потребне измене неопходне за реализацију експеримента. Фотографија реализованог система је приказана на слици 1.

Током извођења експеримента, асинхрони мотор је контролисан применом векторске контроле и радио је у брзинском режиму рада. Векторка контрола је реализована коришћењем софтверског алата Matlab/Simulink, који генерише код на основу имплементiranог модела и даље тај код се спушта на микроконтролер LAUNCHXL-F28379D. На слици 2. приказан је изглед Matlab/Simulink модела за реализацију векторског управљања асинхроне машине. Најбитније део векторског управљања смештен је у блоку „контрола“, мерење и скалирање фазних струја, подешавање енкодера, струјни d и q регулатори и SVPWM модулатор су реализовани у оквиру овог блока. У блоку „брзинска петља“ су смештени неопходни алгоритми за контролу брзине. Мерење брзине је спроведено енкодером постављеним на вратило машине.

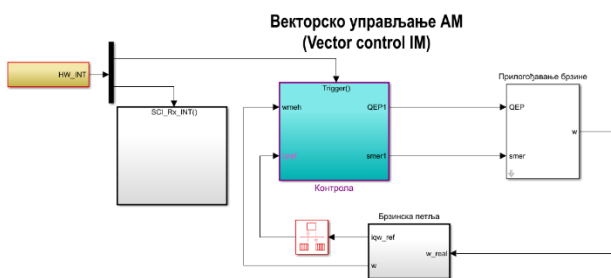
Машина која је механички спрегнута са мотором да би задавала жељено оптерећење морала је радити је у моментном режиму рада, контролисана је Danfoss фреквентним претварачем, док управљањем фреквентим претварачем обезбеђено PLC-ом серије S7-1200 Siemens.

Задатак експеримента је провера на које све величине утиче смањење капацитета електролитског кондензатора испод оптималне вредности, а да се притом мотор терети различитим врстама оптерећења - шта се дешава са напоном у једносмерном међуколу, какав је облик струје у једносмерном међуколу. Такође, задатак је да се на основу добијених вредности дође до закључка да ли постоји могућност да за унапред познате услове рада и врсту оптерећења одабере кондензатор чија је капацитивност мања од оптималне вредности односно да се у ситуацијама када погон ради у променљивим условима рада са обзиром на оптерећење на вратилу машине избор кондензатора оптимизује.

Због стандардизације, оптимални кондензатор за ову поставку би био први већи доступан кондензатор, а то је $C_{DC}=250 \mu F$. У експерименту коришћени су кондензатори мањег капацитета од оптималног. Па тако кондензатори који су коришћени у експерименту су: $C_{DC}=110 \mu F$ и $C_{DC}=220 \mu F$. Употребом кондензатора $C_{DC}=220 \mu F$ проверава се да ли мало смањење капацитивности утиче на нормалан рад погона, док се постављањем кондензатора капацитета $C_{DC}=110 \mu F$ проверава рад са значајно нижом вредности кондензатора од оптималне.



Слика 1. Експериментална поставка експеримента



Слика 2. Модел векторског управљања AM реализован у „Матлаб-Симулинк“

3.2. Принцип задавања оптерећења

За реализацију је искоришћен систем који се састоји од индустријског претварача учестаности и програмибилни логички контролер. Претварач учестаности је параметрисан за рад у векторској контроли за рад у моментном режиму рада (са затвореном повратном спрегом по брзини). Блок шема система је приказана на слици 3.

Задатак претварача учестаности је да одржава момент на вратилу машине коју напаја, док је задатак програмибилног контролера да формира референтну вредност тог момента. За одређивање жељеног момента користи се стварна брзина вратила машине (како су и испитивана и оптеретна машина круто спрегнуте то је истовремено и брзина испитиване машине). Брзина се добија помоћу класичног решења употребом инкременталног енкодера ⁽¹⁾ који се са фреквентним претварачем повезује преко предодређених дигиталних улаза (у случају *Danfoss FC302* претварача то су улази 32 и 33). Фреквентни претварач преко унутрашњих алгоритама рачуна вредност брзине и прослеђује је контролеру преко Ethernet комуникационог протокола ⁽²⁾. Вредност референце момента се израчунава унутар логичког контролера и поново коришћењем Ethernet комуникационог протокола „предаје“ фреквентном претварачу ⁽³⁾.

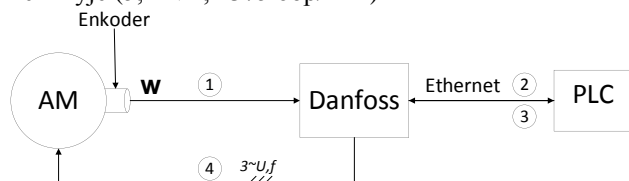
Рачунање референтног момента се остварује коришћењем полинома чији ред је могуће по жељи мењати:

$$m_m = \sum_{i=0}^n k_i * \omega^i = k_0 + k_1 * \omega + k_2 * \omega^2 + \dots + k_n * \omega^n \quad (10)$$

где је:

- k_i - коефицијенти полинома карактеристике момента за различите „ступене“ брзине обртања
- i - „степен“ брзине обртања

У конкретном случају је изабрано да се полином (10) дефише до трећег степена, док се до коефицијената полинома долази се на бази података машине која се испитује (5,2 Nm, 1375 обр/мин)



Слика 3. Блок дијаграм задавања момента оптерећења

3.3. Експериментални резултати

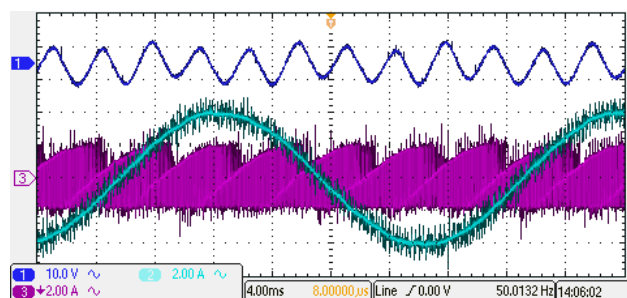
У наставку рада приказани су резултати добијени спровођењем експеримената на описаној поставци при употреби наведених кондензатора при различитим врстама терета.

Као најзначајнији параметри који дефинишу исправност избора кондензатора једносмерног међукола препознати су таласност струје и таласност напона. Таласност струје је параметар који директно утиче на поузданост и живодни век кондензатора јер повећање струје преко мере засигурно доводи до прегревања електролитског кондензатора и превременог отказа. Са друге стране, таласност напона је параметар који директно и индиректно може утицати на перформансе целокупног погона јер дозвољавање превелике таласности може довести до смањења ефикасности у рада али и до немогућности савладавања појединих радних стања.

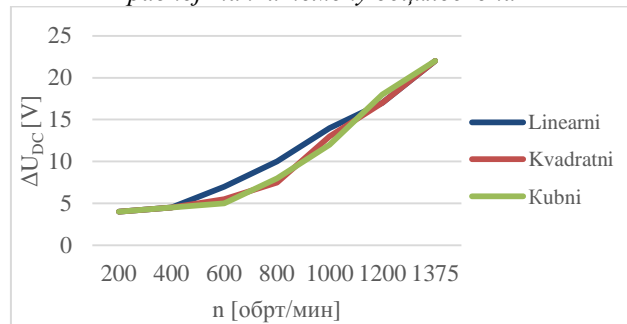
На слици 4 приказан је изглед осцилоскопом сниманих параметара за једну радну тачку. Талас плаве боје приказује напон једносмерног међукола, љубичастом бојом приказана је струја једносмерног међукола, а са зеленом бојом приказана је струја на излазу инвертора.

У наставку су приказани резултати спроведених експеримената који су урађени у широком опсегу промене брзине и момент односно за велику број радних тачака у којима се нашао погон. Резултати су приказани за две вредности капацитета кондензатора, 220 μF и 110 μF .

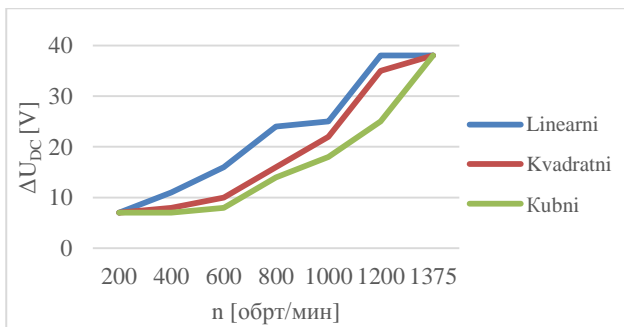
На сликама 5 и 6 приказана је промена вредности таласности напона једносмерног међукола, а на сликама 7 и 8 приказана је промена вредност таласности струје једносмерног међукола при чему се задавање момента оптерећења реализује по принципу дефинисаним са полиномом (10).



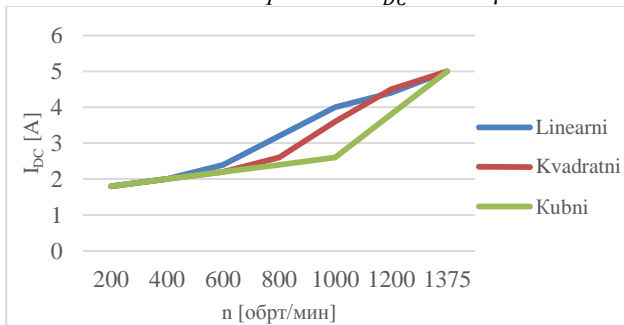
Слика 4. Приказ мерења потребних величина у једној радној тачки помоћу осцилоскопа



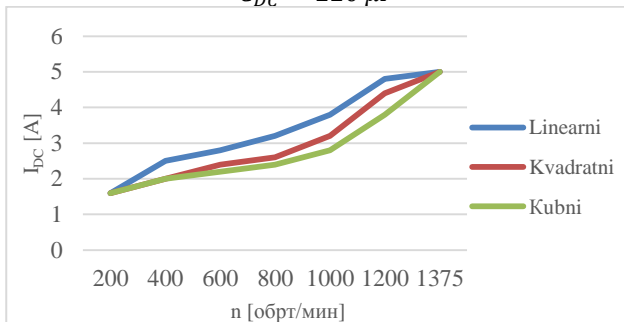
Слика 5. Вредност таласности напона у једносмерном међуколу при различитој зависности момента од брзине за $C_{DC} = 220 \mu\text{F}$



Слика 6. Вредност таласности напона у једносмерном међуколу при различитој зависности момента од брзине за $C_{DC} = 110 \mu F$



Слика 7. Вредност струје у једносмерном међуколу при различитој зависности момента од брзине за $C_{DC} = 220 \mu F$



Слика 8. Вредност струје у једносмерном међуколу при различитој зависности момента од брзине за $C_{DC} = 110 \mu F$

Како за испитиване карактеристике важи да повећањем брзине обртања долази до повећања момента оптерећења добијени резултати су очекивани па са повећањем оптерећења долази до повећања таласности напона и таласности струје. Ако се зна да вредност таласности напона мора бити мања од десетог дела средње вредности напона у једносмерном међуколу, у овом случају максимална дозвољена таласност напона је 29V.

Такође, код електролитичких кондензатора важи да струја кондензатора коју може пропустити је $20 \text{ mA}/\mu\text{F}$ [2] па на основу тога максимална струја која може протећи кроз кондензатор капацитивности $C_{DC} = 220 \mu\text{F}$ је 4,4А, кроз кондензатор капацитивности $C_{DC} = 110 \mu\text{F}$ је 2,2А. Према томе на основу слика 5 и 7 може се закључити да је опсег рада кондензатор капацитивности $C_{DC} = 220 \mu\text{F}$ је веома велик, да при линеарној зависности момента од брзине опсег рада је од (0% – 85%) номиналне брзине. Исти опсег рада важи и за моменат који зависи од квадрата брзине, док код момента који зависи од куба брзине опсег рада је већи и износи (0%-88%) номиналне

брзине. За кондензатор капацитивности $C = 110 \mu\text{F}$ опсег рада је значајно мањи па тако на основу слика 6 и 8 може се приметити да при линеарној зависности момента од брзине опсег рада је од (0% – 15%) номиналне брзине, док је за моменат који зависи од квадрата и куба брзине опсег рада (0% -30%) номиналне брзине.

3. ЗАКЉУЧАК

У раду је приказана анализа зависности вредности капацитета кондензатора једносмерног међукола и карактеристика оптерећења за случај векторски контролисане трофазне асинхроне машине.

Експерименти су спроведени за три различите карактеристике оптерећења, линеарно, квадратно и кубно, и у случају две вредности капацитета електролитичког кондензатора $220 \mu\text{F}$ и $110 \mu\text{F}$, при чему је већа вредност блиска оптималној, а нижа значајно мања од оптимално прорачунате. Закључено је да параметри таласности напона и струје показују очекиване карактеристике и да се у случају смањења капацитета испод оптималне може очекивати превремени отказ кондензатора. Такође, закључено је и то да се у ситуацији када погон може имати значајне промене у режимима рада односно често „померање“ радне тачке, могуће је вршити додатну оптимизацију капацитивности кондензатора са тенденцијом умањења вредности у односу на прорачунату и самим тим утицати на смањење димензија и цене претварача.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] U. Ayhan and A. M. Hava, "Investigation of DC bus current harmonics in two level inverters," National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2010, pp. 158-162.
- [2] P. Gath and M. Lucas, "Designing LC filters for AC-motor drives," IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, 1995, pp. 1050-1052 vol.2, doi: 10.1109/IAS.1995.530418
- [3] Ahmet M. Hava, Ufuk Ayhan, Vahap Volkan Aban, "A DC Bus Capacitor Design Method for Various Inverter Applications," IEEE-ECCE 2012 Conference, September 2012, Raleigh, NC, USA

Кратка биографија:



Амар Хајдарпашић рођен је у Пећи 1998. год. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Електротехника и рачунарство – Енергетска електроника и електричне машине одбранио је 2021. год.



Драган Милићевић рођен је у Тузли 1977. Докторирао је на Факултету техничких наука 2004. год., а од 2014 је звању ванредни професор. Област интересовања су енергетска електроника, електромоторни погони и обновљиви извори електричне енергије.