



# 4Q ПРЕТВАРАЧ КАО УЛАЗНИ ДИО ВСД ПРЕТВАРАЧА

Миломир Шоја, Слободан Лубура, Марко Икић

e-mail: [milomir.soja@etf.unssa.rs.ba](mailto:milomir.soja@etf.unssa.rs.ba), [slubura@gmail.com](mailto:slubura@gmail.com), [markoikic@yahoo.com](mailto:markoikic@yahoo.com)

Електротехнички факултет Источно Сарајево, Република Српска-Босна и Херцеговина

**Садржај:** У раду су приказани резултати симулације 4Q претварача, који ради као ВВРФС и као инвертор за враћање енергије у мрежу, у склопу VSD. Задовољавајуће понашање претварача у свим режимима рада, потврдило је оправданост изложене концепције и употребе Dual-Current Mode Control за управљање претварачем.

**Кључне ријечи:** 4Q претварач, ефикасност, PFC, VSD (variable speed drive).

## 1. УВОД

У данашњем свијету појединци, корпорације и владе показују појачано интересовање за смањење потрошње електричне енергије и побољшање њеног квалитета. Технологија то омогућава, а економија захтијева. Посебна пажња усмјерена на индустријски најчешће потрошаче, електричне моторе (ЕМ), јер су ту ефекти уштеде и побољшања квалитета највећи. У САД се у производњи, користи више од 40 милиона мотора, што чини 65-70% потрошње електричне енергије у индустрији и око 57% укупне свјетске потрошње. Смањење потрошње за само неколико процената (процјењена свјетска годишња потрошња електричне енергије је више од 16000 TWh) представљало би огромну уштеду. *Institute of Engineering and Technology* предвиђа да би у UK могло бити уштеђено годишње 5 TWh само коришћењем ефикаснијих мотора (Eff1), а то је 1/3 енергије које је планирана да буде генерисана 2010. год. помоћу фотонапонских модула у цијелој Европи. *U.S. Department of Energy* је 1996. спекулисао са уштедом од 5 TWh/год. до 2000. год., и потенцијално 100 TWh/год. до 2010. год., узимајући у обзир уштеде код мотора и одговарајућих система напајања. Европским тржиштем ЕМ, снага 750 W и више, доминирају АС мотори са учешћем од 96% (преко 9 милиона), од којих су 87% 3-фазни АСМ (наизмјенични индукциони мотори). [1] [2] [5]

## 2. УШТЕДА ЕНЕРГИЈЕ КОД ЕМ ПОГОНА

Први начин уштеде електричне енергије код ЕМ погона је коришћење ефикаснијих типова постојећих мотора, са новим конструкционим рјешењима и уз коришћење бољих материјала [5]. Други је употреба нових типова мотора, на пр. BLDC (*Brushless DC*) и

PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*), који могу повећати ефикасности за 10% до 15%, у поређењу са АСМ [3]. Трећи, и најважнији, начин је ефикасније коришћење мотора увођењем интелигентних система управљања.

Већина АСМ има ефикасност 75-90%, при пуном оптерећењу. Ако мотори стандардно раде са мањим оптерећењима могуће је уштедети 50% набавне цијене погона (мотор+претварач+управљање) годишње, смањењем потрошње енергије оствареним оптимизацијом ефикасности за дати опсег оптерећења. Сматра се да 44% свих мотора у индустрији трајно ради са мање од 40% номиналног оптерећења. Данашњи интелигентни погони са промјењивом брзином (VSD - *variable-speed drives*) могу се прилагодити свакој примјени обезбјеђујући максимални момент или брзину само када је то неопходно. Када се за погоне пумпи и вентилатора користе VSD са АСМ могуће су годишње уштеде енергије до 50% (према [5] чак 67%). [11]

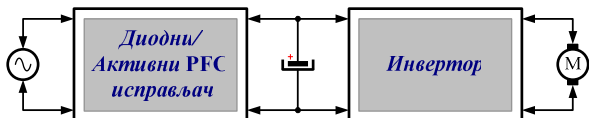
Осим тога, VSD системи са спејс-вектор управљањем омогућавају рад мотора са максималном ефикасношћу, за типичне промјене брзине и момента, оптимизацијом орјентације магнетних поља статора и ротора (обично око 90°). [5]

Додатна погодност коришћења VSD система је да и друге карактеристике погона могу бити оптимизоване, често без значајног смањења укупне енергетске ефикасности (као што су: брзи и стабилни динамички одзиви при промјенама оптерећења, прецизно управљање брзином или моментом, меко стартовање и кочење, спречавање заустављања при малим брзинама, остваривање великих момената при покретању и детекција грешке). VSD често омогућава елиминисање редуктора, каишева и других механичких дијелова погона. Напредни управљачки алгоритми (*Direct Torque Control*), заједно са модерним претварачима енергетске електронике, омогућили су продор АСМ у области које су раније били у искључивом домену DC мотора. У задње вријеме цијена АСМ+управљање постаје конкурентна цијени DC мотора+управљање.

## 3. VSD И ПРОБЛЕМИ КОЈЕ ИЗАЗИВА

Примјена нових алгоритама управљања омогућена је снажним развојем компоненти/уређаја

енергетске и дигиталне електронике. На Сл. 1. је дата блок шема VSD, који се састоји од мотора, инвертора за управљање мотором, једносмјерног међукруга, исправљача и наизмјеничног извора. Задатак исправљача је да обезбједи једносмјерни напон за напајање инвертора. Кондензатор у једносмјерном међукругу служи за филтрирање исправљеног напона, обезбјеђење нискоимпедантног излаза исправљача, акумулацију енергије у генераторском режиму рада и за (конструкционо) повећање поузданости рада инвертора спречавањем појаве комутационих пренапона [10]. Инвертор, омогућава жељено понашање мотора, управљањем стањем својих прекидача у складу са алгоритмом управљања.



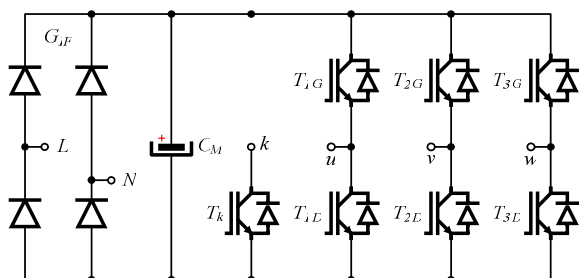
Сл. 1. Блок шема VSD

Оба претварачка блока, која заједно изледају као AC/AC претварач, свој посао обављају веома ефикасно. Губици снаге у њима вишеструко се компензују повећаном ефикасношћу које сеостварује управљањем струјама у фазама магнетних поља и предностима рада са промјењивом брзином.

Ток енергије, у општем случају, може бити од наизмјеничног извора према мотору (моторни режим), али и од мотора према извору (генераторски режим). Враћање енергије у извор могуће је само уз коришћење одговарајућег четворквадрантног (4Q) претварача на мјесту исправљача.

Улазни исправљач би требао да, поред уобичајених - ефикасан једноставан, јефтин, поуздан - има следеће карактеристике: (1) излазни DC напон  $\approx 550$  V, константан и без наизмјеничне компоненте за све дозвољене вриједности улазног напона и оптерећења; (2) улазни фактор снаге  $PF=1$  (улазна струја у фази са улазним напонем и истог таласног облика); (3) могућност враћања енергије у мрежу (улазна струја истог таласног облика као улазни напон, али фазно помјерена за  $180^\circ$ ); (4) погодан за интеграцију у јединствено конструкционо рјешење са трофазним инвертором.

У огромном броју случајева улазни исправљач је реализован као диодни мост, једнофазни (Сл. 2.) или трофазни, са филтерским кондензатором великог капацитета на излазу.



Сл. 2. Електрична шема VSD са транзистором за кочење и једнофазним диодним мостом

Такав исправљач задовољава само захтјев (4). Осим тога, због нелинеарног карактера свог рада (струја изразито несинусоидална), он се јавља као значајан генератор виших струјних хармоника, због чега је улазни фактор снаге мали (0.5-0.6), а проблеми које изазивају хармоници велики. [6] [7] [8]

Негативне последице присуства хармоника у енергетском систему огледају се у проблемима у раду уређаја и смањеној ефикасности преношења електричне енергије (мањи PF). Најчешћи проблеми које изазивају хармоници су везани за додатно загријавање водича, трансформатора и мотора (обично када је ниво изобличења изнад 8%), и погрешан/нестабилан рад уређаја. [6]

У индустрији, већи фактор снаге значи мање рачуне, могућност прикључења више активног оптерећења по грани, и већу ефикасност, због мањих падова напона. Други важан разлог за бригу о фактору снаге је законске природе. Европске земље захтијевају поправак фактора снаге напојних јединица снаге веће од 75 W (IEC 555) и ограничење хармонијског садржаја који напојне јединице могу инјектовати у мрежу према IEC/EN61000-3-2. [10]

Управљање фактором снаге на ефикасан начин значи мање губитке енергије, и у мотору и у електронским претварачима

Код система мање снаге (до 100 W), користе се пасивне методе поправка фактора снаге (PFC). Њихова енергетска ефикасност може бити релативно велика, око 96%. Између мреже и исправљача се поставља нископропусни филтер, обично састављен од индуктивности, кондензатора и отпора. Пасивна рјешења генерално не задовољавају код EM погона, због великих димензија компоненти и малог укупног фактора снаге (типично око 0.75). [9]

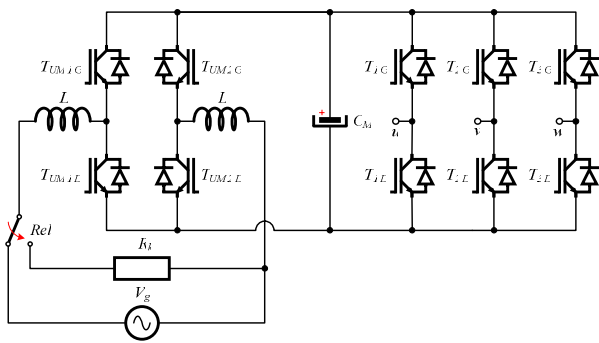
Активни PFC уређај у себи садржи DC/DC претварач код кога се промјеном фактора испуне (ШИМ) прекидача обезбјеђује да улазна струја буде пропорционална улазном напону. Било који прекидачки DC/DC претварач има PFC способности ако му је улазна импеданса приближно отпорног карактера. Када је улазни отпор линеаран очекује се јединични PF. [8] Због тога што је ефикасан, јефтин, једноставан и поуздан у око 90% случајева практичне примјене PFC кругова користи се подизач напона, који представља најбољи избор када нема потребе за галванском изолацијом и ако је дозвољено да излазни DC напон буде већи од максимума улазног AC напона. Једина озбиљна мана подизача је немогућност ограничења потезне и излазне струје, али се додавањем једне активне компоненте и то може превазићи. Последњих година је уложено много труда да би се побољшале карактеристике овог претварача. Највећи напори су усмјерени на повећање ефикасности, при чему је један правац био коришћење нових компоненти (SiC диоде), а други смањење губитака провођења увођењем шема PFC подизача које раде без исправљачког моста [9] [10]. У [9] је приказан *Bridgeless Boost PFC (BBPFC)*, са универзалним улазним напонем, снаге 500 W. Фактор снаге је практично исти као код конвенционалног PFC подизача, док је ефикасност већа за више од 1%, у цијелом радном опсегу снага (мјерено при минималном улазном напону, 90 V), прије свега због мањих губитака

провођења и употребе SiC диода. Активним методама могу се постићи веома високе вриједности фактора снаге, 0.98 и више, са разумно великим компонентама, мада енергетска ефикасност може бити нешто мања него код пасивних метода (94% - 96%).

#### 4. VSD SA MOGUЋNOŠĆU PFC

Основни подизач напона се може, у варијанти једнофазног улаза, веома успјешно примјенити за PFC у VSD. При томе задовољава све постављене захтјеве, осим што не омогућава враћање енергије у мрежу. У пракси су уобичајеније трофазне топологије PFC кругова, најчешће у варијанти подизача напона. Њихова генерална мана је усложњавање и знатно поскупљивање VSD. Додатна мана трофазног PFC подизача је висок излазни напон. У последње вријеме су приказане и неке нове топологије, са dobrim карактеристикама (Ћук-Ћук подизач-спуштач [3]), али са, нажалост још сложенијим шемама.

4Q претварач, употребљен на мјесту исправљача (у једнофазној варијанти), могао би задовољити све постављене захтјеве, уз минимално усложњавање шеме (Сл.3.) [10].



Сл. 3. Електрична шема VSD са 4Q претварачем

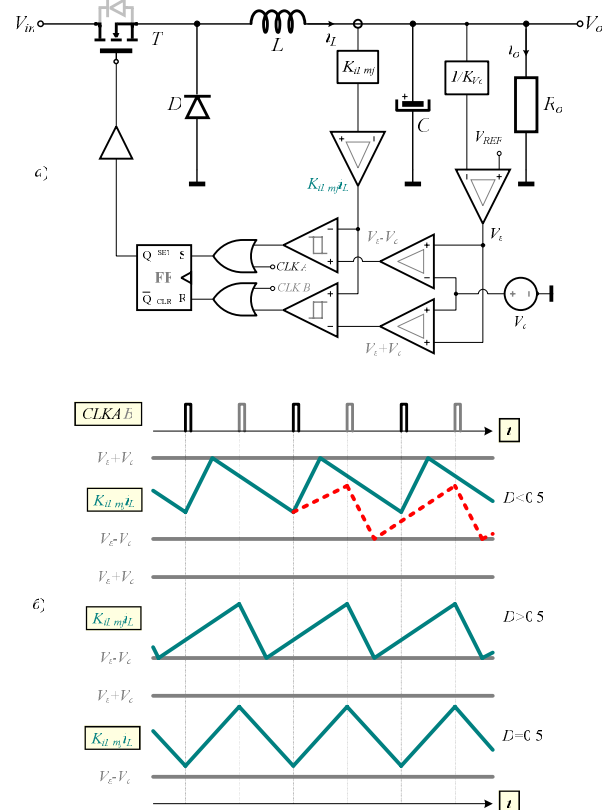
У моторном режиму, 4Q претварач ради као ВВРФС. При томе су активна два доња прекидача, док се два горња користе као диоде. Излазни напон 4Q претварача (улазни напон инвертора) је константан (са неминовном 100 Hz компонентом), док је улазна струја у фази са напонам и истог таласног облика [9] [10]. Осим одличних PFC карактеристика, ВВРФС се одликује и великом ефикасношћу, што је за примјену у VSD од огромне важности. У генераторском режиму рада енергија се од мотора преноси у једносмјерни међукруг, изазивајући пораст напона на кондензатору  $C_M$ . 4Q претварач, сада као инвертор са свим активним прекидачима, враћа ту енергију у мрежу, уједно одржавајући напон на  $C_M$  у сигурним границама. Са становишта ефикасности, ово је најбоље рјешење. Струја 4Q претварача/инвертора је за 180° помјерена у односу на напон мреже, а осим тога, мора бити истог таласног облика као улазни напон и са малим садржајем хармоника. Враћену енергију/струју би могли користити други потрошачи у окружењу, смањујући локалну потрошњу. Ако таквих потрошача нема струја се може враћати директно у дистрибутивну мрежу, што локално бројило енергије може регистровати. Проблем може настати ако

мрежа или локални потрошачи нису у стању да прихвате враћену енергију. У том случају се укључи прекидач  $Rel$  и на излаз 4Q претварача споји кочиони отпорник, чиме се, без додавања снажних компоненти и усложњавања управљачке електронике, омогући сигуран рад VSD и у овом режиму. Примјењени начин управљања 4Q претварачем, због изузетно квалитетног ограничења струје, омогућава сигуран рад и у случају кратког споја на излазу претварача, што се може искористити за даље поједностављење предложеног рјешења и избацивање кочионот отпорника [10]. Резултати симулације доказују исправност предложеног рјешења.

Предложени 4Q претварач је симетричан и омогућава једноставно задовољење свих конструкторских захтјева, без обзира да ли се реализује са дискретним или интегрисаним снажним полупроводничким компонентама.

#### 5. УПРАВЉАЊЕ 4Q ПРЕТВАРАЧЕМ

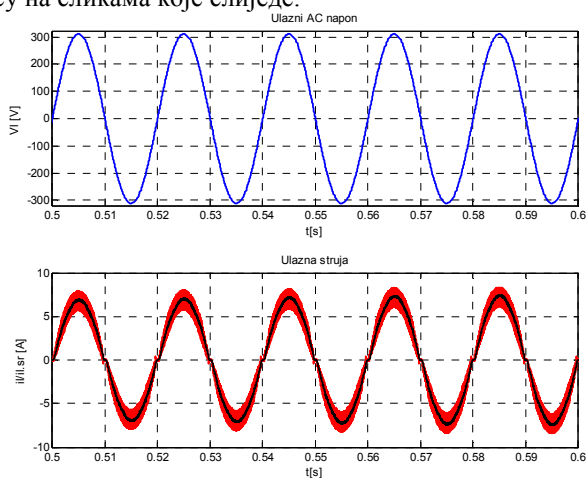
Улазним 4Q претварачем, у оба режима рада, управљано је помоћу тзв. *Dual-Current Mode Control* (DCMC), Сл.4. [4]. Специфичност DCMC представљају: (1) два низа такт импулса, фазно помјерених за 180° ( $CLKA$ ,  $CLKB$ ), и (2) два компаратора, на којима се пореде мјерена струја пригушнице  $K_{iL,mj} \cdot i_L$  и збир/разлика излазног напона појачавача грешке  $V_e$  и напона  $V_a$ . Промјена струје пригушнице увијек се налази унутар појаса ширине  $2V_a$ . DCMC ради као РСМС (*Peak Current-Mode Control*) за факторе испуне  $D < 0.5$ , као ВСМС (*Valley Current-Mode Control*) за  $D > 0.5$ , а из једног режима рада у други прелази природно, па је стабилан за све вриједности  $D$ . [10]



Сл.4. а) Принцип управљања спуштачем помоћу DCMC, б) карактеристични сигнали

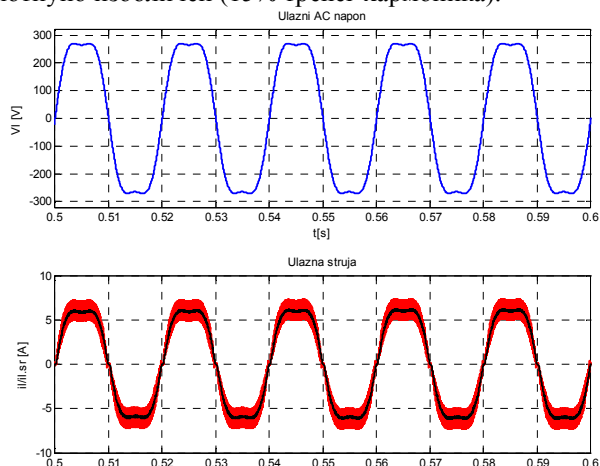
## 6. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ

**ВВРРС:** Резултати симулација (MATLAB.Simulink), за улазни напон 220 V, излазни 550 V, снагу на излазу од 1000 W и за неколико вриједности капацитета филтерског кондензатора  $C_M$ , приказани су на сликама које сљеде.



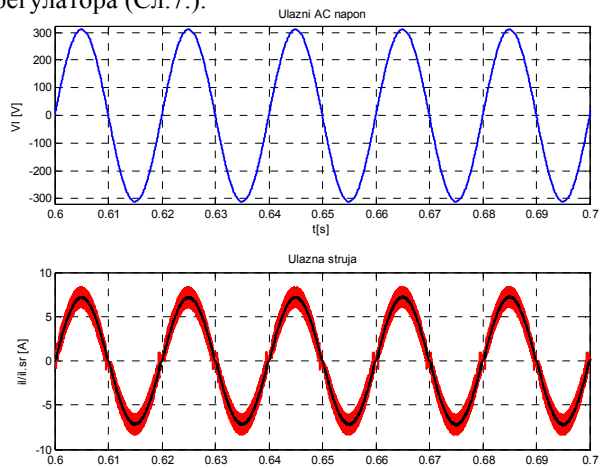
Сл. 5. Улазни напон и струја ( $C=1000 \mu\text{F}$ )

Са Сл.6. се види да ВВРРС са DСМС успијева да формира струју која сљедећи таласни облик улазног напона и у фази је са њим, чак и када је напон потпуно изобличен (15% трећег хармоника).



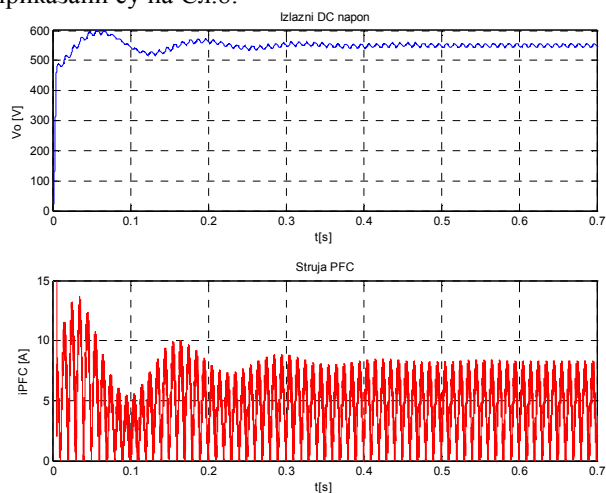
Сл. 6. Улазни напон и струја ( $C=470 \mu\text{F}$ ,  $U_{3h}=15\%$ )

Изобличења улазне струје, у околини проласка кроз нулу, могу се смањити одговарајућим подешавањем регулатора (Сл.7.).



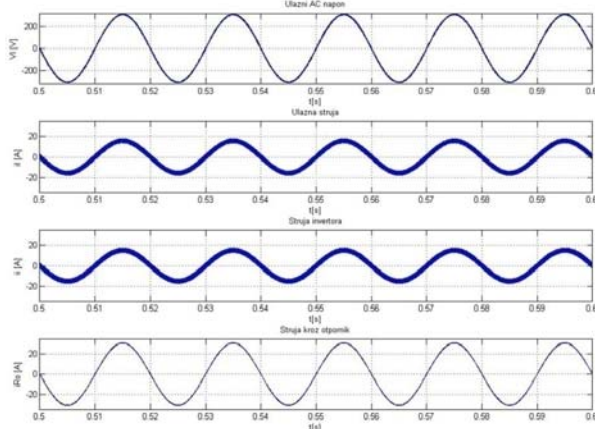
Сл. 7. Улазни напон и струја ( $C=470 \mu\text{F}$ ,  $K_{iL.mj}=10$ )

Илазни напон и струја ВВРРС, у тренутку укључења, приказани су на Сл.8.



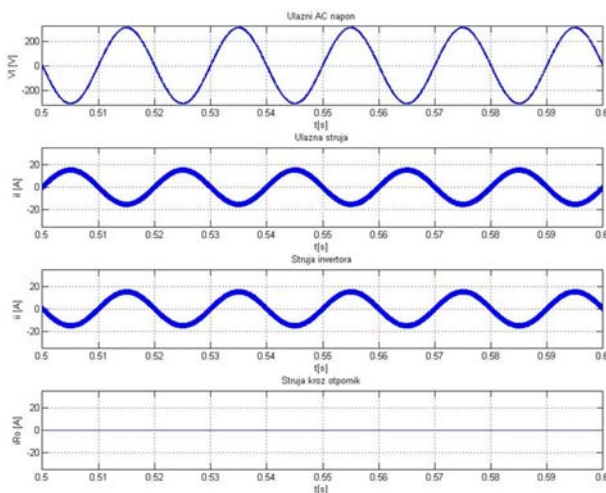
Сл. 8. Излазни напон и струја ( $C=470 \mu\text{F}$ ,  $K_{iL.mj}=10$ )

**ИНВЕРТОР:** Таласни облици улазног напона, и струје, струје инвертора и потрошача ( $R_o=10 \Omega$ ), приказани су на Сл. 9. Струја потрошача једнака је збиру мрежне и струје инвертора, односно струја мреже је умањена за вриједност струје инвертора.



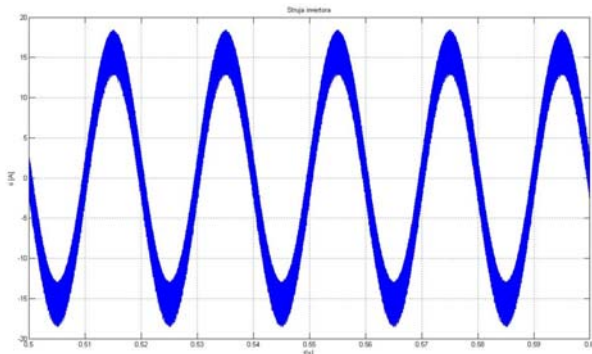
Сл. 9. Таласни облици напона и струја ( $R_o=10 \Omega$ )

На Сл.10. су приказани напони и струје у случају да нема локалног потрошача и да се сва струја враћа у мрежу (у против фази је у односу на мрежни напон).



Сл.10. Таласни облици напона и струја ( $R_o=\infty$ )

На Сл.11. је струја 4Q претварача који ради у кратком споју (без кочионог отпорника). Захваљујући довољно великом индуктивитету пригушница и одговарајућој прекидачкој фреквенцији, струја је задржала синусни таласни облик (нема ограничења струје инвертор).



Сл.11. Струја инвертора у кратком споју

## 7. ЗАКЉУЧАК

Приказани симулациони резултати показују велике могућности примјене 4Q претварача, управљаног са DСМС, на мјесту улазног исправљача VSD. Понуђено рјешење задовољава све постављене захтјеве, понаша се задовољавајуће у свим режимима рада и може значајно да допринесе повећању ефикасности погона и квалитета електричне енергије.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] "Power Electronics System-A Joint Course", taught by Virginia Polytechnic Institute and State University, University of Wisconsin – Madison, Rensselaer Polytechnic Institute, University of Puerto Rico – Mayaguez, North Carolina A&T State University, 2005.,
- [2] Lee F. C., "Power Electronics System – Introduction", Virginia Tech, 2005.,
- [3] En Beng Lang, "Driving up the efficiency of motor based applications through improved control", [Embedded Europe](#), 08/12/09,

- [4] Anunciada A., Silva M. M., "A New Current Mode Control Process and Applications", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 6, NO. 4., 1991.,
- [5] Richard Newell, "Motor efficiency depends on power-factor correction, too", [Power Management DesignLine](#), 06/12/09,
- [6] Timothy. L. Skvarenina, "The Power Electronic Handbook", CRC PRESS, 2002.,
- [7] J.V. MILANOVIĆ, "POWER QUALITY: STATE OF THE ART AND FUTURE TRENDS", ELECTRONICS, VOL. 7, NO. 2., DECEMBER 2003.,
- [8] Erickson R. W., Maksimović D., "Fundamental of Power Electronic - second edition", Springer Science+Business Media, LLC, 2001.,
- [9] Bing Lu, Ron Brown, Marco Soldano, "Bridgeless PFC Implementation Using One Cycle Control Technique", APEC '05,
- [10] Миломир Шоја, „Нови прилози у примјени струјног управљања у DC/DC и DC/AC претварачима“, ЕТФ Источно Сарајево, 2008. год.,
- [11] Joe Roy, "Efficient motor/controls save terawatt-hours/year", Fairchild Semiconductor South Portland, ME, <http://www.fairchildsemi.com>, septembar, 2009.

## 4Q CONVERTER AS INPUT STAGE OF VSD CONVERTERS

**Abstract:** The paper presents the results of simulations 4Q converter, which works as VVPFC as inverter to restore power in the power network, within the VSD. Satisfactory behavior of converters in all modes, confirmed the reasonableness exposed to the concept and use of Dual-Mode Current Control Management converter.

**Key words:** 4Q converter, Efficiency, PFC, VSD (variable speed drive).