



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ



Драгана Петровић

**Нови приступ повећању енергетске
ефикасности система напајања**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Бања Лука, 2022



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING



Dragana Petrović

The new approach to increasing the energy efficiency of power supply systems

DOCTORAL DISSERTATION

Banja Luka, 2022

ИНФОРМАЦИЈЕ О МЕНТОРУ И ДИСЕРТАЦИЈИ

Ментор: Проф. др Бранко Блануша, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци.

Наслов докторске дисертације: Нови приступ повећању енергетске ефикасности система напајања

Резиме:

Циљ истраживања докторске дисертације је да се обезбеди ефикасно, поуздано и контролисано напајање телекомуникационе опреме коришћењем различитих извора обновљиве енергије. Реализовано решење комбинује различите изворе енергије, сунце и ветар заједно са акумулаторском батеријом која служи за складиштење енергије, али се користи и као извор. Батерија се користи као извор само у временском периоду када обновљиви извори немају довољно енергије за напајање потрошача. Контролисање расположиве енергије, реализовано је контролером на бази фази логике. Фази правила дефинишу референтне вредности величина које одређују перформансе претварача који дефинише количину енергије која ће се користити из појединачног извора. Описани систем омогућава управљање са два серијска претварача на које су повезани различити извори енергије. Имплементација контролера на бази фази логике, омогућава боље праћење максималне снаге користећи балансирање снаге, приоритет напајања и максималну уштеду коришћења батерије како би пад напона током прелазних периода остао у опсегу дозвољених вредности. Основни циљ система је да потрошач не остане без напајања. Баланс улазне и излазне снаге израчунава се на основу расположиве снаге из обновљивих извора, потребне снаге за пуњење батерије и тренутне потребе за напајање потрошача. Приоритет напајања подразумева редослед укључења расположивих извора енергије, односно укључење ФН система, затим ветроагрегата и на крају батерије као извора енергије. Уштеда у коришћењу батерије се постиже тако што се батерија користи као извор енергије само у ситуацијама када нема довољно енергије из обновљивих извора. Утицај електромагнетних сметњи, смањен је пројектовањем филтра реализован Mn-Zn феритом као магнетним материјалом и посебно дизајнираним округлим феритним језгром са великим пререзом за провлачење енергетског кабла.

Експериментална анализа предложеног система индицира да промене енергије која се добија из појединих извора енергије не утичу на напајање потрошача. Хибридни систем напајања реагује на промене улазне снаге тако да се очекује да прелазни режими не утичу на промену вредности излазног напона. Контролер на бази фази логике омогућава несметано напајање потрошача из различитих извора енергије.

Организација напајања телекомуникационог центра, тако да основни напон напајања буде једносмерни напон, повезивањем различитих извора енергије и коришћење контролера на бази фази логике омогућава се минималан број претварања напона, односно ефикасно коришћење енергије добијене из обновљивих извора.

Кључне речи: енергетска електроника, обновљиви извори енергије, Фази контролер, хибридни систем напајања, ЕМИ сметње

Научна област: Инжењерство и технологија

Нучно поље: Електротехника, електроника и информационо инжењерство

Класификациона CERIF ознака: T 170

Тип одбране лиценце Креативне заједнице: CC BY-SA

INFORMATION ABOUT THE MENTOR AND THE DISSERTATION

Mentor: Prof. dr Branko Blanuša, full professor, Faculty of Electrical Engineering Banja Luka

Title of the dissertation: The new approach to increasing the energy efficiency of power supply systems

Summary:

The research goal of this PhD thesis is to provide a system for the efficient, reliable and controllable power supply of telecommunications equipment via different renewable energy sources. The proposed solution combines different energy sources: solar, wind and a rechargeable battery for energy storage and energy sources. The battery is only used when the renewable sources lack the power required for supplying the load. The control of the available energy, has been realized with a fuzzy logic based controller. The output of the fuzzy controller is the voltage reference of the converter, which defines the amount of power that shall be used from the given sources. The described system enables control with two serial converters which are connected to different sources of energy. Implementation of the controller, based on fuzzy logic, enables: better maximum power point tracking via power balancing, supply prioritization and battery energy savings such that during transient regimes the output voltage remains within the acceptable limits. The main purpose of the system is to ensure that the load does not lose its power supply. The difference in input and output power is calculated based on the available power from the renewable sources, power at the output of the DC/DC converter, required energy for charging the battery and the current need for load supply. The power supply priority is defined as the sequence by which the available energy sources are activated: first the PV system, then the wind turbine and finally the battery. Battery savings are achieved by using the battery as a power source only when there is a lack of energy from the renewable sources. The influence of electromagnetic interference is reduced with the design of a filter built with a Mn-Zn ferrite used as the magnetic material and a specially designed round ferrite core with a large slot purposed for inserting the power cable. Experimental analysis indicates that changes in the power generated from the individual power sources has negligible effect on the output supply. The hybrid power supply system quickly reacts to the changes to the input power, so it is expected the transient regimes have negligible effect on the output voltage. It has been proved

that a controller based on fuzzy logic enables undisturbed power supply via different renewable energy sources. The organization of the power supply of the telecommunications center, such that the basic supply is a DC voltage and additional power sources are connected in parallel, results in a minimum number of conversions and thus a maximum efficiency in terms of the energy received from the renewable sources.

Keywords: Power electronics, Renewable energy sources, *Fuzzy*, Hybrid power supply system, EMI suppressor

Scientific field: Engineering and technology

Research field: Electrical engineering, electronics and information engineering

Classification CERIF mark: T 170

Type of Creative Commons license: CC BY-SA

Захвалница

Захваљујем се мом дугогодишњем руководиоцу др Мирославу Лазићу који ме је увео у свет електронике и у свет науке.

Захваљујем се свом ментору, проф. др Бранку Блануши на свесрдној и професионалној подрици.

Захваљујем се колегама из Сектора енергетске електронике на помоћи током израде докторске дисертације као и руководству ИРИТЕЛ-а које је омогућило моје докторске студије. Посебно се захваљујем колегиници Наташи Станић на несебичној подрици.

Захваљујем се свим члановима комисије на сугестијама у току завршне фазе израде докторске дисертације.

Захваљујем се мојим родитељима што су ме научили да не одустајем.

Захваљујем се супругу и деци, мом брату и снаји и мојим кумовима, на стрпљењу разумевању и љубави.

Докторску дисертацију посвећујем Михаилу, Софији и Алекси.

Садржај:

1. УВОД	1
2. СИСТЕМИ НАПАЈАЊА ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОНЕ ОПРЕМЕ	5
2.1. Извори електричне енергије	5
2.1.1. Енергија сунца	7
2.1.2. Енергија ветра	8
2.1.3. Хидроенергија	8
2.1.4. Агрегати	8
2.2. Енергетски претварачи	9
2.3. Акумулациони елементи	10
2.4. Ефикасност коришћења енергије	11
3. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ПРЕДМЕТНОЈ ОБЛАСТИ	14
3.1. Технике управљања енергетским претварачима у хибридном системима напајања заснованим на обновљивим изворима енергије	14
3.2. Фотонапонски системи	21
3.3. Системи са ветроагрегатом	26
3.4. Гориве ћелије као извори енергије	30
3.5. Хибридни системи напајања	33
3.6. Софтверски алат примењен у хибридном системима напајања	47
4. Реализација управљачког модула	52
4.1. Опис управљачког модула	52
4.1.1. Управљање претварачем на који је повезан ФН систем	58
4.1.2. Управљање претварачем на који је повезан ветроагрегат	67
4.1.3. Правила коришћења батерије	69
4.2. Резултати симулације	70
5. КВАЛИТЕТ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ХИБРИДНИМ СИСТЕМИМА ЗА НАПАЈАЊЕ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОНИХ УРЕЂАЈА	73
5.1. Квалитет електричне енергије	73
5.2. Електромагнетна компатибилност телекомуникационог система	73
5.2.1. Кондуктивне сметње хибридног система напајања	83
5.2.2. Поље сметњи	86

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АНАЛИЗА.....	88
7. ЗАКЉУЧАК	96
ЛИТЕРАТУРА.....	99
БИОГРАФИЈА.....	104
Прилози.....	106
Изјава 1	107
Изјава 2	108
Изјава 3	109

Слике:

Слика 2.1. Процењена дневна и годишња соларна енергија доступна за енергетске примене

Слика 2.2. Претварање енергије

Слика 2.3. Ефикасност различитих извора енергије.

Слика 3.1. Блок шема система за примену за различите изворе у хибридним системима напајања

Слика 3.2. Реална и процењена стања у првом тесту: а) струја индуктора; б) излазни напон

Слика 3.3. Поређење перформанси праћења на различитим референтним вредностима у тесту 2 (а) ПИ контролера; (б) предложени контролер

Слика 3.4. Функције улаза и излаза контролера на бази фази логике

Слика 3.5. Профили зрачења а) синусоидални б) троугласти

Слика 3.6. Блок шема фотонапонског система на бази фази логике

Слика 3.7. Температура и зрачење ФН панела

Слика 3.8. График излазне снаге ФН панела

Слика 3.9. Губици снаге са и без оптимизације

Слика 3.10. Ефикасност претварача са и без оптимизације

Слика 3.11. Систем претварања енергије ветра

Слика 3.12. Управљање перформансама под константном брзином и константним напоном DC везе

(а) референтна и измерена брзина, (б) грешка брзине

Слика 3.13. Карактеристични таласни облици при константној брзини и променљивом напону једносмерног међукола

(а) референтна и измерена брзина, (б) грешка брзине, (в) регулација напона једносмерног међукола

Слика 3.14. Карактеристични таласни облици при променљивој брзини и константном напону једносмерног међукола

(а) референтна и измерена брзина, (б) грешка брзине, (в) регулација напона једносмерног међукола

Слика 3.15. Микро мрежа на једносмерном нивоу преноса енергије

Слика 3.16. График ефикасности DC/DC претварача и DC/AC претварача

Слика 3.17. Блок дијаграм управљачке логике

Слика 3.18. Хибридни систем напајања који садржи ФН панел, гориву ћелију, батерију и суперкондензатор

Слика 3.19. Резултати поређења различитих стратегија

а) потрошња водоника б) напуњеност батерије

Слика 3.20. Графички приказ симулације стратегије хибридног система управљања

Слика 3.21. Хибридни систем напајања који садржи ФН панел и ветроагрегат

Слика 3.22. Повезивање извора напајања преко инвертујућег спуштача-подизача напона

Слика 3.23. Блок дијаграм хибридног система напајања

Слика 3.24. Хибридни систем напајања употребом енергије сунца, гориве ћелије и енергије таласа

Слика 3.25. Блок шема напајања са два би дирекциона DC/DC претварача

Слика 3.26. Упредни резултати циљних и измерених величина (напон, струја батерије и струја суперкондензатора)

Слика 3.27. Хибридни систем напајања употребом енергије сунца, ветра и гориве ћелије

Слика 3.28. Могуће комбинације извора напајања за обезбеђење довољне енергије за потрошач

Слика 3.29. Дијаграм тока енергије предложеног хибридног система

Слика 4.1. Блок шема реализованог хибридног система напајања

Слика 4.2. Блок дијаграм система примењеног за управљање хибридним системом напајања

Слика 4.3. Блок дијаграм фази система

Слика 4.4. Блок шема управљачког система спуштача напона за прикључење ФН панела

Слика 4.5. Вредности улазних (G_{SP} , $\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}$, SOC, Δ) и излазних (ΔV_{SP_ref}) функција припадности

Слика 4.6. Спуштач напона са линеарним моделом ФН система

Слика 4.7. Линеаризација ФН панела у околини MPPT тачке

Слика 4.8. Подешавање параметара ПИ регулатора у функцију спрегнутог преноса помоћу *Bode* дијаграма

Слика 4.9. Вредности улазних (G_{VG} , G_{SP} , SOC) и излазних (ΔP_{VG_ref}) функција припадности

Слика 4.11. Дијаграм излазне струје према најгорем сценарију хибридног извора напајања

Слика 5.1. Деловање ЕМИ сметњи

Слика 5.2. Посебно дизајнирано цевасто феритно језгро

Слика 5.3. Модел феритног језгра за тестирање

Слика 5.4 (а) Зависност имденасе индуктивне компоненте од броја намотаја, (б) зависност импедансе од јачине струје

Слика 5.5 Различити начини мотања индуктивне компоненте RSO филтра

Слика 5.6 Импулсни одзив на узлазну и силазну ивицу ($I = 2 \text{ A}$ (лево) и 5 A (десно)) за различите конфигурације и $N = 4$ намотаја

Слика 5.7. Спектар кондуктивних сметњи за систем напајања мерено пре уградње RSO филтра

Слика 5.8. Кондуктивне сметње за сиситем напајања након уградње RSO филтра

Слика 5.9. Спектар поља сметњи мерено у лабораторијским условима пре интервенције на уређају

Слика 5.10. Спектар поља сметњи мерено у лабораторијским условима након интервенције на уређају

Слика 6.1. Експериментална поставка

Слика 6.2. Реализовано решење хибридног система напајања

Слика 6.3. Дијаграми излазних струја серијских претварача

Слика 6.4. Напон и струја батерије - прелазни режим напајања потрошача из батерије.

Слика 6.5. Напон и струја батерије у прелазном режиму са обновљивих извора на батерије

Слика 6.6. Напон и струја батерије у прелазном режиму са батеријског на обновљиве изворе напајања

Слика 6.7. Дијаграм излазне струје према најгорем сценарију хибридног извора напајања.

Табеле:

Табела 3.1. Упоредна анализа описаних техника управљања

Табела 3.2. Поређење времена пораста између класичног ПИ и предложеног контролера

Табела 3.3. Однос улаза и излаза контролера на бази фази логике

Табела 3.4. Ефикасност МРРТ технике

Табела 3.5. Карактеристике различитих врста горивих ћелија

Табела 3.6. Параметри пројектованог система

Табела 3.7. Резултати различитих стратегија управљања

Табела 3.8. Стање система

Табела 3.9. Правила фази контроле

Табела 3.10. Једногодишњи параметри система симулирани ХОМЕР-ом

Табела 3.11. Оптимална конфигурација система за различита просечна дневна оптерећења

Табела 4.1. Режим рада ФН система у односу на напуњеност батерије

Табела 4.2. Правила фази логике ФН система

Табела 4.3. Елементи за прорачун спуштача напона

Табела 4.4. Линеаризација модела претварача у МРРТ радној тачки

Табела 5.1. Материјали коришћени за оклопљавање - основни подаци

Табела 5.2. Импеданса феритног језгра округлог кабла у односу на фреквенцију за различит број намотаја

Табела 5.3. Импеданса феритног језгра округлог кабла у односу на фреквенцију за различиту струју

1. УВОД

Предмет истраживања у овој докторској дисертацији је једно решење хибридног напајања, које омогућава оптимизовано коришћење обновљивих извора енергије. Нови приступ хибридног напајања је намењен за напајање телекомуникационих уређаја на локацијама код којих није доступна електродистрибутивна мрежа.

У 2018. години према Међународном енергетском удружењу (IEA) у свету је потрошено 22,315 TWh енергије и то: 38 % из угља, 23 % од природног гаса, 16,2 из хидроакумулација, 10,1% из термонуклеарних реактора, 2,9% из нафте, а само 9,3 % из енергије сунца, ветра, геотермалне енергије и енергије морских таласа [1]. Проценат коришћења обновљивих извора енергије је сваке године већи. Упоредо са истраживањима на обновљивим изворима енергије дефинисане су и процедуре о управљању одрживим изворима енергије и повећању енергетске ефикасности, а уведени су и подстицаји државе да се користе обновљиви извори енергије и да се повећава енергетска ефикасност. Према стандардима ISO 50001:2018 и SRPS EN ISO 14001:2015 један од начина повећања енергетске ефикасности је и коришћење обновљивих извора енергије уместо необновљивих (фосилних).

У обновљиву енергију спада енергија сунца, ветра, енергија из хидроакумулација, морских таласа и геотермална енергија. Обновљива енергија је неисцрпна, обнавља се у одређеном временском периоду у целини или делимично. Циљ сакупљања овакве енергије је да се она претвори у електричну енергију или да енергија загрева / хлади воду и ваздух. Енергија воде у рекама и језерима се хидрогенераторима претвара у електричну енергију, енергија ветра покреће ветроагрегат, фотонапонски (ФН) панели апсорбују видљиво зрачење сунца и производе једносмерну струју, топлотним пумпама се топлотна енергија преноси из једне средине у другу. ФН термални колектори постављени на кровове апсорбују топлотно зрачење сунца и загревају течност, или ваздух, ФН панелима могуће је допуњавати акумулаторске батерије, напајати потрошаче који користе једносмерни напон напајања или се ФН систем прикључује на дистрибутивну мрежу. На овај начин се штеде необновљиви (фосилни) извори енергије, смањује се емисија угљен-диоксида и других штетних гасова који негативно утичу на глобално загревање и климатске промене.

Ефикасност претварања енергије дефинише се при претварању једног облика енергије у други, а најчешће механичке, топлотне, хемијске и нуклеарне у електричну. Енергетска ефикасност је уштеда у производњи, преносу и примени енергије коришћењем енергетски ефикасних производа. У последњих десет година повећала се ефикасност искоришћења електричне енергије тако што кућни апарати троше 40 % мање енергије, (тј. око 40% су ефикаснији), аутомобили троше 30 % мање горива, а топлотно изоловане куће троше 40 % мање топлотне енергије, нове сијалице 80 % мање енергије итд. На тај начин се штеди енергија, новац и мање су потребе за градњом нових извора електричне енергије на бази фосилних горива. На светском нивоу, реализацијом различитих пројеката о заштити животне средине, подиже се свест људи о очувању животне средине, коришћењу енергетски ефикасних производа, изолацији стамбених и пословних објеката и повећању коришћења електричних возила [2].

Један од основних проблема у примени обновљивих извора енергије су брзе промене снаге коју може да произведе извор [3]. Стабилан систем напајања који се ослања само на обновљиве изворе енергије подразумева да, у сваком тренутку, обезбеди потребну енергију за напајање потрошача. Једно од решења је предимензионисање система које се није показало као исплативо решење, а други начин је коришћење софистицираних система за складиштење енергије [4]. У данашње време постоје разноврсне технологије за складиштење енергије различите аутономије и капацитета [5,6].

Аутономни електрични производни системи, који се заснивају на обновљивим изворима енергије су конкурентна економска опција, упоређујући је са употребом електроагрегата. Хибридни системи, употребом различитих извора енергије, обезбеђују разноврстан пренос снаге у циљу оптимизације енергетске ефикасности система и дугорочне економске исплативости [7].

Користећи обновљиве изворе енергије мале снаге на удаљеним локацијама (ван електро дистрибутивне мреже) могуће је комбиновати различите изворе енергије у хибридни (мешовити) систем напајања, на пример: енергију сунца и ветра са акумулаторском батеријом као складиштем електричне енергије. Акумулаторска батерија тада служи за одржавање стабилности напајања и акумулисање вишка произведене електричне енергије. Акумулирана енергија се користи у времену кад нема довољно расположиве енергије из обновљивих извора енергије. У оваквом систему, ветроагрегат и ФН систем се преко

претвараача повезују са батеријама. Различити извори напајања са описом њихове примене дати су у другом поглављу.

У трећем поглављу описана су истраживања о коришћењу различитих обновљивих извора енергије, међусобно повезивање у системе напајања са освртом на предности и мане таквих система.

Четврто поглавље је централни део докторске дисертације и у њему је описан аутономни систем напајања, у изолованом телекомуникационом систему, са могућношћу повезивања два извора енергије (ФН система и ветроагрегата) и акумулаторске батерије која служи за складиштење вишка енергије или као додатни извор напајања. Пуњење акумулаторске батерије је струјно ограничено тако да се задовољава карактеристика која подразумева пуњење константном струјом до унапред дефинисаног напона пуњења (U_{boost}), затим одржавања константног напона док се струја пуњења не смањи до унапред дефинисане вредности. Када се струја смањи, напон батерије споро опада до напона одржавања батерије (U_{float}). Описана карактеристика се назива IUU карактеристика (константна струја пуњења, константан напон пуњења, константан напон одржавања) и за сваку батерију постоје препоручене вредности напона и струје. Сваки извор енергије има енергетски претварач (серијски стабилизатор), а цео систем је управљан контролером на бази фази логике. Контролер добија податке о потребној и расположивој снази и на бази тога управља претвараачима у систему. Уграђен MPPT алгоритам (енгл. *Maximum Power Point Tracking*) рада омогућава максимално искоришћење расположиве снаге у сваком тренутку. Применом оваквог система управљања омогућено је „интелигентно“ коришћење расположиве снаге из обновљивих извора енергије у аутономном систему, одговарајућа дистрибуција расположиве снаге, те глатки прелази у дистрибуцији снаге са једног на други извор. На овај начин, промене у режиму рада обновљивих извора у систему се не одражавају на квалитет напајања потрошача у телекомуникационом систему.

Пето поглавље докторске дисертације везано је за електромагнетну компатибилност. Проводници којима је претвараач повезан са извором напајања и проводници према потрошачима утичу на повећање електромагнетног зрачења. Анализирано је неколико врста RSO филтара (енгл. *Radio Interference Suppression*) како би се потиснуо утицај електромагнетског зрачења на фреквенцијама посматраног хибридног напајања. Индуктивни филтри који имају двоструко језгро мењају своје особине (магнетна

пермеабилност и диелектрична пропустљивост ферита) са променом фреквенције у фреквенцијском опсегу од 0.1 до 100 MHz. Тестирањем је утврђено боље потискивање шума у односу на комерцијалне линијске филтре тако да је погодно користити их као улазне филтре DC/DC или AC/DC претварача.

У шестом поглављу описана је експериментална поставка. Експериментални резултати добијени на прототипу хибридног система напајања у изолованој телекомуникационој мрежи приказани су графички. Хибридни систем напајања димензионисан је на основу снаге потребне за напајање потрошача и пуњење батерије. Променом референтне вредности претварача на који је повезан извор напајања, подешава се снага која се преузима од извора (у зависности од расположиве снаге). Ако је расположива снага извора већа од снаге коју захтевају потрошачи, променом референтне вредности претварача на који је повезан извор користи се само снага која је потребна потрошачима. Уколико је батерија празна или делимично испразњена, вишак енергије прослеђује се ка батерији. Ако је снага потребна потрошачима већа од расположиве снаге једног извора, додаје се снага из другог извора.

Гrafички су приказани експериментални резултати на којима је приказана промена основног извора напајања, пражњење и допуњавање батерије, прелазак са батерије на основни извор напајања и са основног извора на батерије.

Резултати остварени у реализацији докторске дисертације кратко су сумирани у закључку. Систем напајања је у свим ситуацијама омогућио напајање потрошача и по потреби допуњавање батерија. Након тестирања система и анализе рада закључено је да се хибридни систем напајања са контролером на бази фази логике може користити на телекомуникационим објектима код којих не постоји прикључење на електродистрибутивну мрежу.

2. СИСТЕМИ НАПАЈАЊА ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОНЕ ОПРЕМЕ

Системи напајања су скуп више уређаја који заједно обезбеђују непрекидан рад телекомуникационе, мерне, заштитне и управљачке опреме. Да би рад опреме био поуздан неопходно је да електричне карактеристике излазног напона/струје система напајања буду у складу са стандардима према којима је направљена опрема која се напаја. Стандарди се односе на статичке, динамичке и електромагнетне карактеристике система за напајање. Такође, за поуздан рад опреме која се напаја, неопходно је да се задовоље стандарди који дефинишу да систем напајања не сме утицати на рад друге опреме електромагнетним зрачењем. Систем напајања не сме емитовати сметње које се преко извора напајања могу пренети на друге електричне уређаје повезане на извор и не сме емитовати електромагнетно поље које може произвести неисправан рад опреме у околини. Један од техничких захтева система напајања телекомуникационе опреме је имуност на сметње које емитује опрема у околини, кроз проводнике са којима је повезан са изворима напајања и са потрошачима (кондуктивне сметње), као и кроз амбијент (електромагнетне сметње).

2.1. Извори електричне енергије

Постоје два вида енергије, а то су потенцијална и кинетичка енергија. По облику, разликују се топлотна, механичка, гравитациона, електрична, хемијска, светлосна, нуклеарна, магнетна, еластична, биолошка итд. [8].

У односу на могућност регенерисања, извори енергије могу бити:

- необновљиви и
- обновљиви [1].

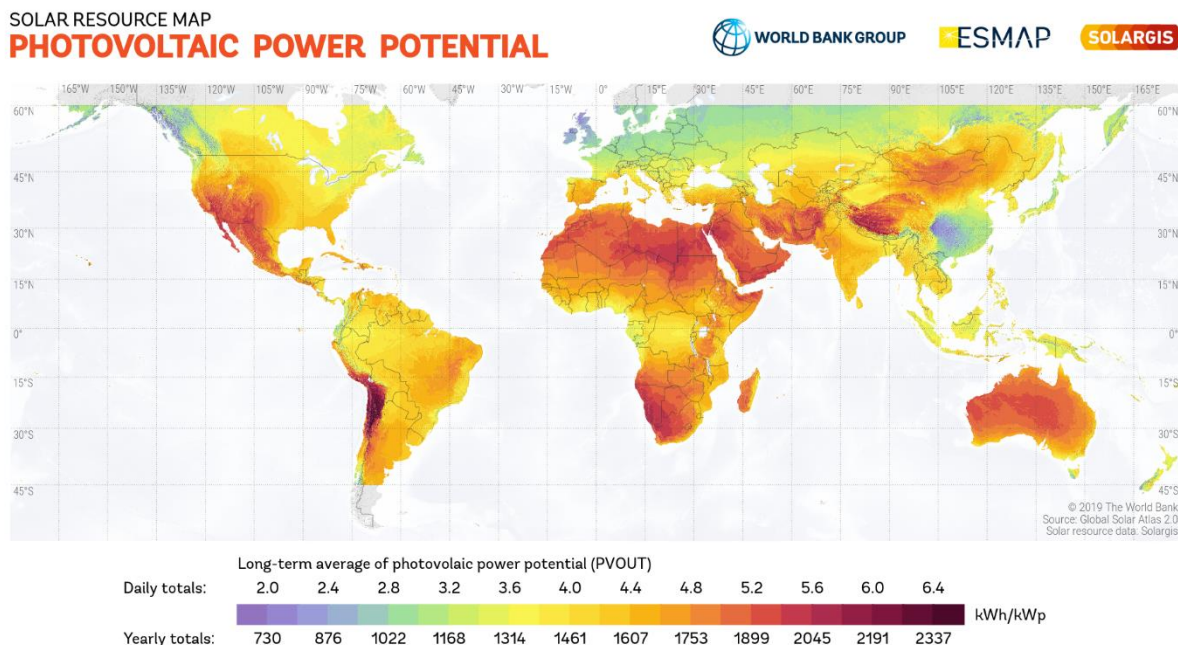
У необновљиве изворе енергије спадају фосилна горива (угаљ, нафта, гас) и нуклеарни распади. На светском нивоу, највише електричне енергије производи се у термоелектранама, где се топлотна енергија претвара у електричну. Енергетска криза седамдесетих година пробудила је свест људи и указала на проблем потрошње резерви фосилних горива. Резерве необновљивих извора енергије процењене су на неколико десетина или стотина година. Коришћење фосилних горива утиче на глобално загревање планете и промену климатских услова што је убрзало примену обновљивих извора. Потребно

за коришћењем обновљивих извора енергије постала је неопходна у циљу енергетске сигурности и еколошке стабилности [9-11].

У обновљиве изворе енергије спадају сунчево зрачење, ветар, водени токови, морске струје и таласи, плима и осека, геотермални извори и биогорива [12-14]. Обновљиви извори енергије као што су биомаса и хидроенергија великих хидроелектрана су се користили почетком 20. века, док у 21. веку започиње експанзија коришћења обновљивих извора као што су енергија сунца, ветра, таласа, плиме и осеке, геотермална енергија и хидроенергија малих и мини хидроелектране итд [12].

Ефикасност директне производње електричне енергије у ФН електранама или водоника у фото-електро-хемијским ћелијама је мала. Свако претварање једног облика енергије у други, или претварање једног облика, или нивоа напона/струје електричне енергије у други смањује ефикасност коришћења извора енергије. Један од значајних изазова у коришћењу обновљивих извора енергије је акумулација енергије. Неки од начина складиштења енергије је употреба реверзибилних хидроелектрана и складиштење енергије у акумулаторима у облику хемијске енергије [8-16].

Обновљиви извори енергије су разноврсни, нестабилни, различито распрострањени и имају техничка ограничења при претварању у електричну енергију. На пример, сунчева енергија је метеоролошки параметар који зависи од географског положаја локације на којој се пријемник налази, према половима је све мање сунца што се може уочити на слици 2.1 [17].



Слика 2.1. Процењена дневна и годишња соларна енергија доступна за енергетске примене [17]

Осветљеност зависи и од годишњег доба, степена облачности и дела дана. Ветрови, такође, зависе од годишњег доба и локације на којој се посматрају. Ветротурбине су дијагностиране да раде унутар одређеног распона брзине ветра. Брзина ветра већа од максималне може довести до механичког оштећења ветротурбине и због тога се ветротурбина, у овом случају, зауставља. Са друге стране, брзина ветра испод минималне брзине нема снагу довољну за покретање ветротурбине и претварању енергије ветра у електричну енергију. Хидроенергија је енергија која се добија кретањем воде и зависи од брзине кретања воде, висинске разлике између извора и истека, климатских промена, односно географског положаја хидроелектроане. Други вид добијања енергије од кретања воде је коришћење таласа, плиме и осеке. Употреба хидроенергије одређена је условима исплативости коришћења, али и условима за очување животне средине [18-22].

2.1.1. Енергија сунца

Енергија сунчевог зрачења емитује се на свим таласним дужинама у инфрацрвеном, видљивом и ултраљубичастом делу спектра. Међутим, атмосфера апсорбује око 20 % упадног зрачења [18]. На просторима Србије и БИХ/Републике Српске Сунчево зрачење је у просеку 1200 W/m^2 . Укупно на површину земље се рефлектује $1.2 \cdot 10^5 \text{ TW}$ снаге сваке секунде, што је укупно $1.2 \cdot 10^{17} \text{ W}$ соларне снаге. Коришћењем ФН панела на 0.16 %

земљине површине било би могуће да се задовоље потребе за енергијом [17,19,20]. Употреба енергије сунца је најраспрострањенија у односу на остале обновљиве изворе енергије. Сваке године се повећава број телекомуникационих објеката где је један од извора енергије, енергија сунца.

2.1.2. Енергија ветра

Масовно покретање ваздуха настаје услед нехомогеног загревања ваздуха. Глобално, настаје услед различитог загревања ниских и високих слојева ваздуха и услед ротације Земље (Кориолисова сила) [19]. Локално, ветар зависи од рељефа који га успорава или усмерава. Јак утицај рељефа на ветар осећа се до висина од око 100 m изнад тла, а ветрови дувају до висина од око 1-2 km, односно до висине облака. Изнад те висине ваздух је редак, нема водене паре и ветар је слаб. У грубој апроксимацији брзина ветра расте за 10 % са удвостручењем висине од тла [20]. Телекомуникациони објекти се често налазе на обронцима планина те је примена енергије ветра често добра инвестиција у хибридном систему за напајање електричном енергијом таквих објеката [21].

2.1.3. Хидроенергија

Хидроенергија је доминантана обновљива енергија која се користи углавном у горњим и средњим токовима река где има пада и где се могу изградити хидроакумулације. Бројне реке свуда у свету су испресецане бранама на којима су уграђени генератори за производњу струје. Прва хидроелектрана изграђена је на Нијагариним водопадима док је највећа у Кини на реци Јанг Ценг Јанг са инсталисаном снагом од 22,500 GW [22]. Просечан међугодишњи раст укупног инсталираног капацитета хидроенергије за пет година између 2016. и 2020. био је 1,8 %, стим да је пораст у 2020. години износио 21 GW што представља повећање од 1,6 % у односу на 2019. годину [23].

2.1.4. Агрегати

Агрегатска постројења, енергију фосилних горива, претварају у електричну енергију и углавном се користе као резервни извори енергије. Агрегатско постројење се укључује и користи када је снабдевање из основног извора напајања у прекиду. Сви важни телекомуникациони објекти имају агрегат као резервни извор енергије. Основни проблем коришћења агрегата је допремање горива до локације, а нарочито током зиме. Агрегати су

електромеханички уређаји који имају обртне делове који се хабају па је поузданост агрегата најмања у односу на остале изворе напајања. Употреба агрегата није довољна за напајање уколико је потребно постићи непрекидност рада потрошача. Тренд коришћења обновљивих извора енергије, смањује потрошњу горива које се користи у агрегатима и смањује број радних сати агрегата чиме се продужава век трајања.

2.2. Енергетски претварачи

Енергетски претварачи (конвертори) су значајни елементи система напајања [24]. Улога енергетских претварача је да електричну енергију произведену у изворима електричне енергије трансформишу у облик који одговара карактеристикама потрошача. У сваком систему напајања постоји један или више претварача.

Посебна група енергетских претварача која на излазу обезбеђује непрекидан једносмерни напон/струју, назива се исправљачко постројење. Опрема у телекомуникационим објектима користи два извора енергије: електродистрибутивну мрежу или агрегатно постројење и акумулаторску батерију. На улаз исправљачког постројења доводе се наизменични напон добијен из електродистрибутивне мреже или из електроагрегата и резервни извор напајања, односно акумулаторска батерија. Исправљачко постројење може користити и други вид извора енергије као што је неки од обновљивих извора енергије. Исправљачка постројења имају задатак да обезбеде поуздан и непрекидан рад свим потрошачима који за свој рад користе једносмерни напон/струју, а то су:

- електронски уређаји,
- телекомуникациона и рачунарска опрема,
- електромеханички склопови,
- склопови за управљање електромоторима и
- заштитна опрема, (заштита од пожара, провале итд.)

Исправљачка постројења су склоп од више елемената. Основни елементи су:

- ACD (енгл. *Alternating Current Distribution*) – склоп дистрибуције (развода) наизменичног напона. АС развод прослеђује улазни наизменични напон/струју до АС/DC претварача. У склопу се налазе заштитни елементи, струјна и пренапонска заштита.

- AC/DC претварач са коректором фактора снаге PFC (енгл. *Power Factor Converter*) служи за исправљање наизменичног напона и поправку фактора снаге.
- DC/DC претварач – претварач једносмерног напона/струје нестабилисане вредности у стабилисани једносмерни излазни напон/струју тачно одређене вредности.
- DCD (енгл. *Direct Current Distribution*) - склоп дистрибуције (развода) једносмерног напона. DC развод прослеђује излазни једносмерни напон до потрошача.

Посебна врста AC/DC, или DC/DC претварача су пуњачи батерије код којих се параметри пуњења прилагођавају изабраном типу батерија и степену испразњености батерије тако да се батерија пуни по декларисаним карактеристикама. Обновљиви извори, као што су соларна енергија или енергија ветра се такође могу користити за пуњење акумулаторских батерија уз потребан степен прилагођења. У том случају неопходан је одговарајући претварач који би прилагодио напон/струју на излазу обновљивог извора енергије карактеристикама акумулаторске батерије у циљу добијања одговарајуће струје којом се пуне батерије.

Сваки од поменутих елемената обично има дигитално управљање које контролише рад енергетских претварача тако да излазне напоне/струје прилагођава потребном режиму рада потрошача или батерије. Уз помоћ контролера могу се дефинисати излазне карактеристике претварача, дефинисати прагови аларма, или искључење појединих потрошача уколико се укаже потреба за смањењем потрошње. Подешавањем рада претварача или DC дистрибуције корисник прилагођава напајање захтевима потрошача и на тај начин добија стабилно напајање телекомуникационог система.

2.3. Акумулациони елементи

Један од основних начина складиштења енергије у телекомуникационим објектима су електрохемијски извори напајања, акумулаторске батерије. У зависности од потреба користе се батерије одређених карактеристике и капацитета. Промена енергије у акумулаторским батеријама је реверзибилни процес, будући да се поступцима пуњења акумулаторске батерије могу вратити у стање блиском почетном стању и поново користити као извор једносмерног напона/струје. Основни недостатак акумулаторских батерија, за примену у телекомуникационим објектима је одржавање батерије, односно провера стања батерије. Периодична провера капацитета батерија је неопходан процес за одржавање

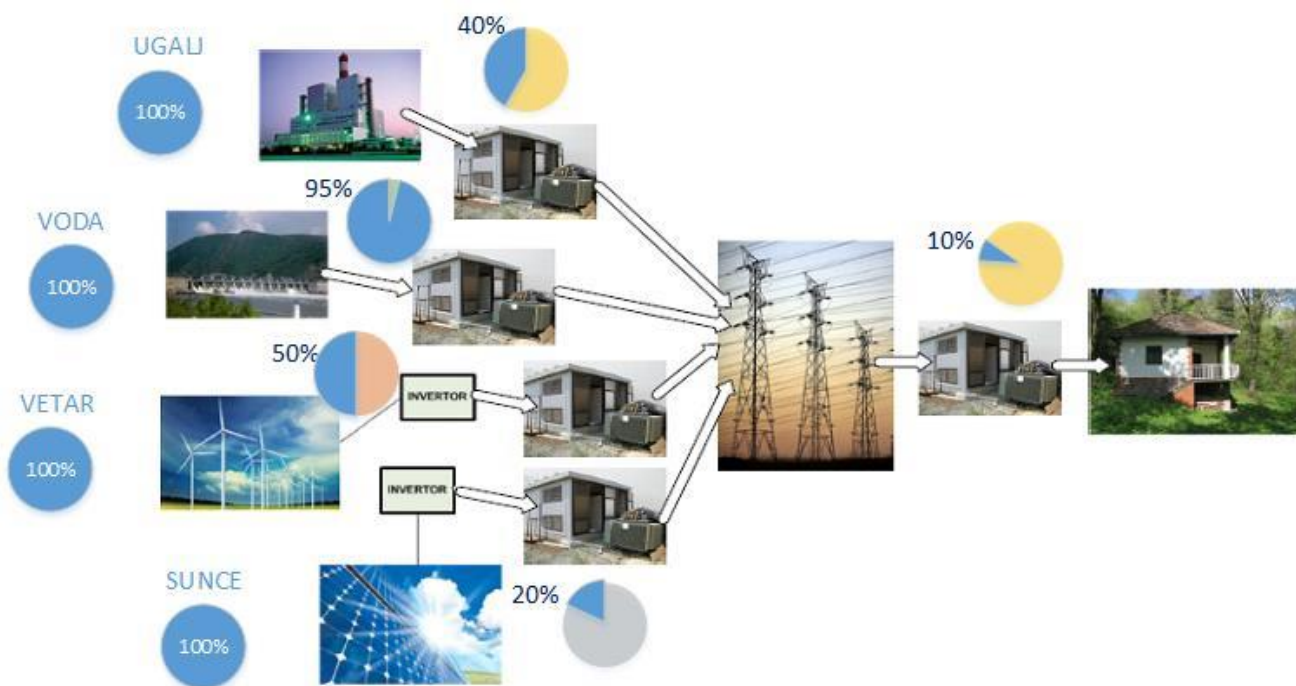
капацитета батерије и века трајања. За поједине батерије, допуњавање мора да буде по унапред дефинисаним карактеристикама. Акумулаторска батерија обезбеђује непрекидан рад потрошача уколико нестане основни извор напајања, од момента нестанка до момента стартовања агрегата. Такође, акумулаторска батерија се користи за складиштење енергије при коришћењу обновљивих извора, када је произведена снага из обновљивих извора већа од снаге потрошача. Складиштена енергија се користи онда када је снага обновљивих извора недовољна за напајање потрошача.

2.4. Ефикасност коришћења енергије

У току производње енергије тежи се економичној производњи, смањењу губитака, економичном транспорту енергије и смањењу негативног утицаја на животну средину. Ефикасност коришћења енергије показује колико се удео енергије може претворити у корисну енергију. При претварању једног облика енергије у други настају губици који смањују ефикасност коришћења енергије. На сликама 2.2 и 2.3 приказано је претварање једног облика енергије у други и проценат који се добија у облику корисне енергије. Највећу ефикасност имају хидроелектране, око 95%, док се енергија сунца искористи до 25% у фотонапонским панелима. За обновљиве изворе енергије, односно енергију која се „не троши“, овакав степен искоришћења није забрињавајући иако свакако треба тежити ка ефикаснијим решењем. Са друге стране, коришћење енергије угља, чија је ефикасност око 40%, мора бити смањено јер фосилна горива нису бесконачан ресурс и морају се штедљиво експлоатисати. Да би се повећало ефикасно коришћење електричне енергије потребно је искористити доступне, еколошки прихватљиве и економски исплативе изворе енергије [25].



Слика 2.2. Претварање енергије [25]



Слика 2.3. Ефикасност различитих извора енергије [25]

Складиштење електричне енергије, уколико се ради о обновљивим изворима енергије, је једна варијанта оптимизованог коришћења енергије. Користити енергију када је она доступна, складиштити у акумулационе елементе и црпети складиштену енергију када извори енергије немају довољну снагу да задовоље потребе потрошача.

Телекомуникациони системи, користе једносмерни напон/струју и дистрибуција наизменичног напона је непотребна. Пренос енергије на једносмерном нивоу и употреба DC/DC претварача повећава енергетску ефикасност. У телекомуникационим системима се складиштење енергије користи како би се потрошачима обезбедило стабилно напајање а самим тим и крајњим корисницима поуздан телекомуникациони пут. Обновљиви извори енергије, који би се користили у сврху напајања телекомуникационих објеката, би допринели уштеди електричне енергије.

3. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ПРЕДМЕТНОЈ ОБЛАСТИ

3.1. Технике управљања енергетским претварачима у хибридном системима напајања заснованим на обновљивим изворима енергије

Ефикасно коришћење електричне енергије могуће је остварити на неколико начина: повећавањем ефикасности у производњи и преносу електричне енергије, повећањем степена корисног дејства у уређајима који користе електричну енергију, коришћење бољих технолошких решења коришћених компоненти и бољих конфигурација за повезивање енергетских претварача, који треба да смање енергетске губитке. Ефикасност претварача се повећава и унапређењем у управљачком делу система.

За успешан прелазак на коришћење обновљивих извора енергије, неопходно је дизајнирање енергетских система који испуњавају циљеве који се односе на капацитет, доступност, поузданост као и повољан економски сегмент. Такође, морају се узети у обзир и други циљеви који се баве еколошким и социјалним или друштвено-политичким питањима [26].

Да би се добили што бољи резултати при коришћењу обновљивих извора енергије и повећала енергетска ефикасност система, истраживачи користе различите електронске уређаје попут DC/AC претварача, активних филтара, регулатора напона, уређаја за корекцију фактора снаге и различите DC/DC претвараче. Међу овим енергетским уређајима DC/DC претварачи су потребни за регулацију једносмерног напона. Одговарајући одабир топологије DC/DC претварача је важан фактор који има значајан допринос у укупним перформансама оваквих система. Поред избора ефикасне топологије DC/DC претварача, за његов оптималан рад, подједнако је важна примена одговарајуће технике управљања. Рад [27] истиче карактеристике доступних и текућих трендова неизолованих претварача као што су неизоловани инвертујући спуштач-подизач напона (*buck-boost DC/DC претварач*), једноструки примарни индукторски претварач, Ћук, *z-source* и хибридне DC/DC претвараче. Рад анализира и различите технике управљања као што су: пропорционално-интегрално диференцијално управљање (енгл. PID- *proportional integral derivative*), клизни режим управљања (енгл. SMC- *slide mode control*), управљање предвиђањем (енгл. MPC- *model predictive control*), моделовање у простору стања (енгл. SSM- *state space modeling*) и управљање на бази фази логике (енгл. FLC- *Fuzzy Logic Control*) у односу на време одзива

и сложеност приликом интеграције са неизолованим DC/DC претварачима у системима напајања [27]. У табели 3.1 приказана је упоредна анализа описаних техника управљања.

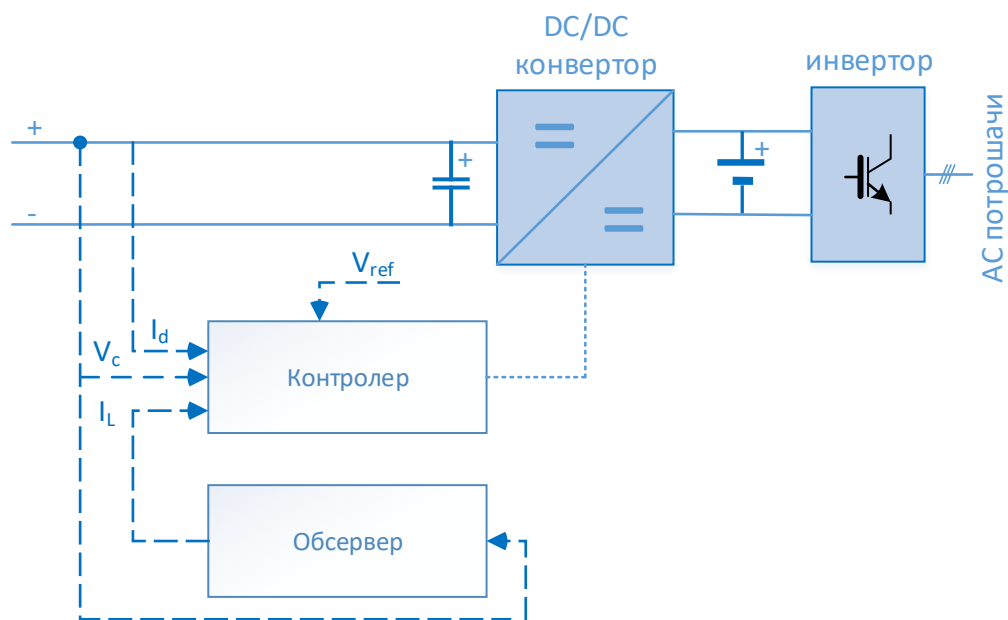
Табела 3.1. Упоредна анализа описаних техника управљања [27]

Техника управљања	Карактеристике	Предности	Недостаци
Пропорционално-интегрално-диференцијално управљање (PID)	- Једноставна имплементација. - Погодан за линеарно управљање. - Ниска комплексност.	- Једноставна имплементација. - Брзи одговор. - Једноставна интеграција са бројним техникама управљања.	- Не може да одговори на варијације оптерећења. - Дугачко време смиривања, грешка у стабилном стању и прескок.
Клизни режим управљања (SMC)	- Робусно и нелинеарно управљање. - Приближава се клизној површини.	- Једноставна имплементација. - Може да потисне спољашњи поремећај. - Кратко време смиривања. - Брза динамика. - Робусност.	- Проблеми са осцилацијама услед дисконтинуалног закона управљања. - Велики прескок.
Управљање предвиђањем (предиктивно управљање) (MPC)	- Једноставније вршење итерације. - Робусно и нелинеарно управљање. - Процењивање будућег стања.	- Оптимизоване прелазне перформансе са спољашњим ограничењима. - Брз одговор. - Ефикасно праћење са техникама процењивања.	- Осетљивост на параметре кола. - Рачунарски захтевно. - Неопходно детаљно познавање модела.
Моделовање у простору стања (SSM)	- Робусно и нелинеарно управљање. - Погодан за МИМО системе. - Омогућава континуално предвиђање стања система.	- Побољшан одзив. - Мањи прескок при променама оптерећења.	- Више времена за првобитну имплементацију. - Неопходно детаљно познавање модела.
Управљање на бази фази логике	- Робусно и нелинеарно управљање. - Стабилност при широком опсегу варијација. - Погодно за системе који имају нејасне граничне услове.	- Мањи прескок. - Ефикасно праћење одговора. - Математички модел није потребан.	- Компликовано израчунавање. - Захтева правила за рад. - Дуже време смиривања.

Према табели 3.1, најједноставнија техника управљања је PID управљање. Потребно је једноставно подешавање три параметра да би се остварило одговарајуће управљање претварачем. Међутим, оваквим управљањем не може да се испуни захтев брзе динамичке реакције, или неравнотеже улазног напона или струје претварача. С тим у вези, SMC поседује велику предност јер може да обезбеди стабилан рад DC/DC претварача током великих поремећаја и бржи динамички одзив. Понашање SMC-а је такво да обезбеђује добре перформансе и стабилност система. Међутим, SMC такође захтева рад са високом прекидачком фреквенцијом, те DC/DC претварачи могу имати велике прекидачке губитке и у том случају значајно смањење ефикасности. Да би се превазишао поменути проблем, предиктивно управљање (MPC) је добро прилагођена техника која је развијена на основу карактеристике претварача (појачање напона, напон на прекидачима, напон на диодама). Принцип рада контроле предвиђања заснива се на контролном алгоритму са повратном петљом. Предност MPC-а је мултиваријабилност, могућност примене у системима са више улаза и излаза. Истовремено обрађује излазе и итерације између системских променљивих. На основу познатих карактеристика претварача, могу се добити добре перформансе у погледу управљања, а самим тим смањење губитака при промени стања прекидача за различите радне циклусе претварача. Негативна страна ове технике је што је сложена за примену и захтева неколико покушаја и грешака да би се одредили параметри. Примена постаје још тежа када се ради о нелинеарном моделу претварача. У том погледу, применом SSM-а добијају се добре управљачке карактеристике и робусне перформансе. Будући да се SSM модел заснива на математичкој репрезентацији система помоћу скупа улаза и излаза, променљивих стања и диференцијалних једначина, врло лако се могу превазићи проблеми управљања због нелинеарности. Техника управљања коришћењем контролера на бази фази логике је модерна техника управљања која се користи за управљање нелинеарним системима са бољим одзивом референтног праћења. Не захтева ниједан математички модел система и има скуп правила који опонашају људски мисаони процес те се препоручује за управљање нелинеарним системима, или система код којег неки параметри нису познати, или се њихова природа промене не може математички описати [27].

Техником линеарног управљања DC/DC претварача се не решава проблем везан за излазне карактеристике обновљивих извора енергије и прилагођење улазима у DC/DC претварач. Блок шема представљена на слици 3.1 и описана у раду [28] може се користити

за различите енергетске примене као што су системи на чијем улазу може да се повеже излаз ФН панела или гориве ћелије. Описан је робусни јефтин нелинеарни контролер заснован на клизном режиму који омогућује брзу реакцију излазног напона на промену вредности улазних података. Анализира се проблем управљања DC/DC претварача у циљу добијања максималне снаге (МПП). Улазне величине контролера које су потребне за реализацију MPPT алгоритма су улазни напон, улазна струја у DC/DC претварач и референтна вредност напона DC/DC претварача. Контролер, такође, анализира сметње, скоковите промене референтног напона, промене улазне струје и нагле промене једносмерног напона [28].



Слика 3.1. Блок шема система за примену за различите изворе у хибридним системима напајања [28]

Нелинеарна регулациона шема реализована је тако да се преко нелинеарног обсервера управља DC/DC претварачем како би се постигло одржавање излазног напона и струје и праћење тачке максималне снаге. Изабран је нелинеарни обсервер да би се избегла редундантност сензора и самим тим смањила сложеност и трошкови реализације [28].

Контролер је дизајниран тако да је омогућен баланс између перформанси динамичког праћења, одржавање излазног напона у односу на промене напона на излазима из извора као и потребне енергије за напајање потрошача. Услови стабилности система постигнути су применом теорије Љапунова. Сprovedена анализа обухватала је различите сценарије испитивања праћења путање процене стања и потискивања сметњи.

Контролер описан у раду [28] анализира вектор грешке у три стања који представља тренутне као кумулативне грешке за процену критеријума пролазности и робусности. Анализа укључује и стратегију управљања клизним режимом у два корака. Прво се бира клизна површина како би се системска стања навела на унапред дефинисану површину. Вектор грешке се састоји од интеграла грешке праћења излазног напона (e_1), грешке праћења напона (e_2), као и грешке праћења струје (e_3) које су дефинисане као:

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int V_{ref} dt - \int V_c dt \\ V_{ref} - V_c \\ I_{Lref} - I_L \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

где је I_{Lref} референтна струја коју генерише контролер напонске петље, I_{Lref} измерена струја обсервера, V_c је улазни напон регулисан око константе V_{ref} , а V_{ref} представља жељени излазни напон спуштача напона (*buck* DC/DC претварач).

Из једначине 3.1 следи да је:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_2 \\ -V_c \\ I_{Lref} - I_L \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

Да би се обезбедила стабилност система, референца струје треба да је:

$$I_{Lref} = \frac{c}{u} \left(\frac{I_d}{c} - (1 + \lambda_1 \lambda_2) e_1 - (\lambda_1 + \lambda_2) e_2 \right), \quad (3.3)$$

где су λ_1 и λ_2 реални позитивни бројеви.

Број клизних површина зависи од броја променљивих стања. У овом случају, постоје три стања за проширени модел спуштача напона:

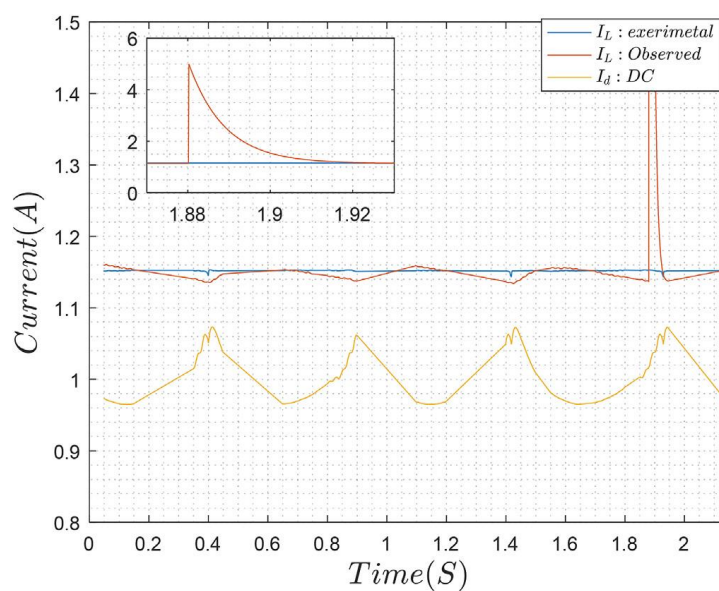
$$\begin{cases} S_1 = e_1 \\ S_2 = e_2 + \lambda_1 e_1 \\ S_3 = \sqrt{L/c} e_3 \end{cases}, \quad (3.4)$$

Контролни улаз треба да обезбеди да је $SS^T < 0$

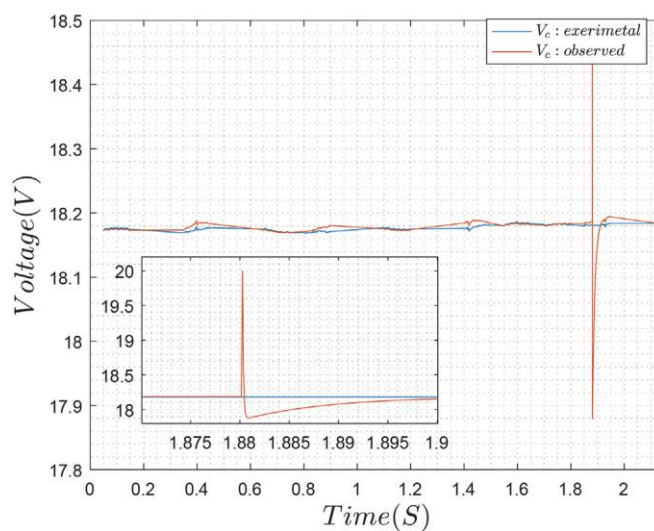
Извод Лапуновљеве функције је негативан (једначина 3.5), што потврђује стабилност и конвергенцију предложене нелинеарне стратегије управљања.

$$SS^T = -\lambda_1 e_1^2 - \lambda_2 (e_2 + \lambda_1 e_1) - \lambda_3 e_3^2 - \lambda_4 |e_3| < 0 \quad (3.5)$$

У првом експерименту описаном у раду [28], процењена стања обсервера се упоређују са стварним стањима почевши од различитих почетних услова. Додатно, сметње (ΔV и ΔI) се генеришу у тренутку $t = 1,88$ s. Посматрајући слику 3.2 се може закључити да процењене променљиве стања одговарају њиховим вредностима реалног стања, што потврђује ефикасност предложеног обсервера за процену стања у реалном времену.



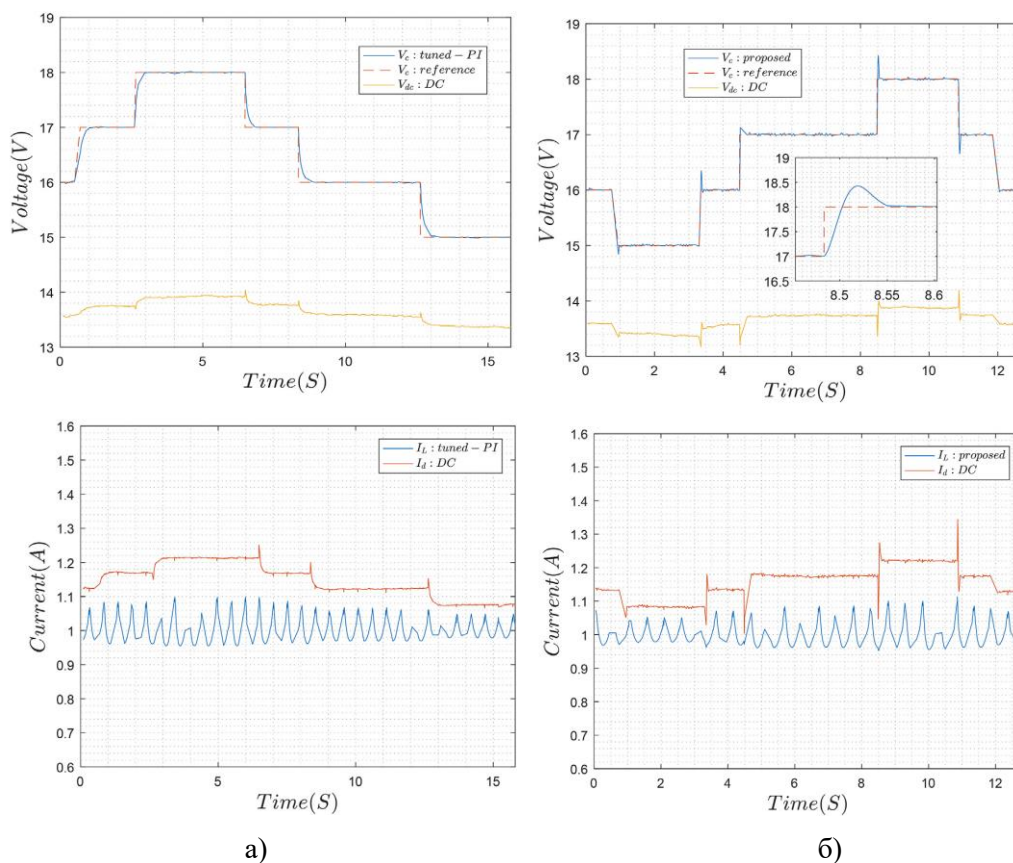
а)



б)

Слика 3.2. Реална и процењена стања у првом тесту: а) струја индуктора; б) излазни напон [28]

У другом тесту, контролер прати дати референтни напон. Референца праћења напона, струја индуктора и излазни напон предложеног контролера и подешеног ПИ контролера су представљени на слици 3.3.



Слика 3.3. Поређење перформанси праћења на различитим референтним вредностима у тесту 2
(а) ПИ контролера; (б) предложени контролер [28]

У табели 3.2 представљено је време пораста напона у односу на референтну вредност за ПИ контролер, односно време смиривања напона за предложену стратегију управљања. Може се закључити да предложени контролер обезбеђује задовољавајући одзив праћења референтне вредности (табела 3.2 и слика 3.3).

Табела 3.2. Поређење времена пораста између класичног ПИ и предложеног контролера [28]

ПИ контролер	Тренутак	T=2.6s	T=6.5s	T=8.4s	T=12,7s
	Време пораста напона	0.261	0.195	0.230	0.287
Предложена стратегија	Тренутак	T=3,3s	T=4.5s	T=8,5s	T=10.8s
	Време смиривања напона	0.040	0.017	0.017	0.016

Резултати симулације и експерименталне примене показали су ефикасност предложеног регулатора у погледу праћења динамике путање излазног напона и кратког времена пораста у поређењу са ПИ регулатором. Предложени регулатор има способност потискивања спољашњих сметњи у једносмерном напону и улазној струји. Овакав приступ је користан због своје флексибилности и економске исплативости за реализацију у различитим системима напајања и због своје економске исплативости [28].

3.2. Фотонапонски системи

Да би се из ФН панела добила максимална снага, неопходна је примена МРРТ алгорита, односно праћење тачке на P-V карактеристици за коју се добија максимална снага на излазу. У раду [29] предложен је МРРТ метод којом се комбинује алгорита који генерише вредност фактора испуне који одговара МРР за било који ниво зрачења.

Контролер на бази фази логике се често користи за праћење тачке максималне снаге ФН панела. Типични контролер на бази фази логике укључује три блока: фазификацију, закључивање и дефазификацију. Сложеност и ефикасност контролера углавном зависи од параметара који се користе као улаз и излаз. У раду [29] улаз у контролер је разлика излазне струје соланих панела у једном периоду одмеравања, (E), а промена фактора испуне (d_a) као излаз.

Грешка се рачуна као:

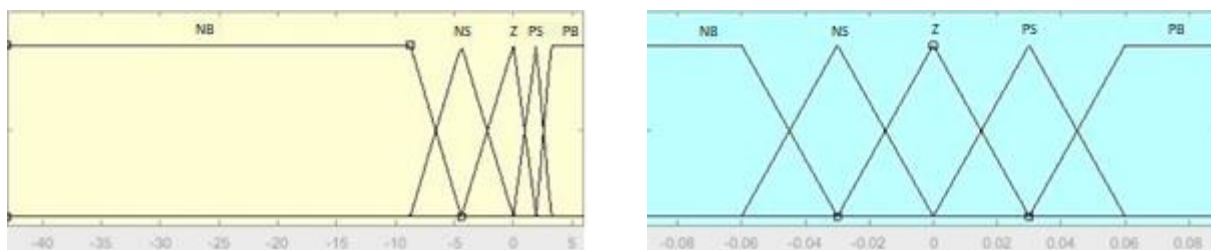
$$E(k) = (P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)) / (V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)), \quad (3.6)$$

где су: $P_{pv}(k)$ и V_{pv} снага и напон ФН панела у тренутку k .

Фазификација омогућава претварање улаза из реалних променљивих у фази променљиве. На слици 3.4 приказане су ознаке улаза и излаза фазификације, НБ ј негативна велика, НС: негативна мала, З: нула, ПС: позитивна мала, ПБ: позитивна велика. Правила која су наведена у табели 3.3 дају везу између улаза и излаза. Да би се добила нумеричка вредност фактора испуне, дефазификацијом се израчунава корак фактора испуне као нумеричка вредност која се прослеђује.

Табела 3.3. Однос улаза и излаза контролера на бази фази логики [29]

/	Улаз (E)	Излаз $d\alpha$
1	PB	NB
2	PS	NS
3	Z	Z
4	NS	PS
5	NB	PB

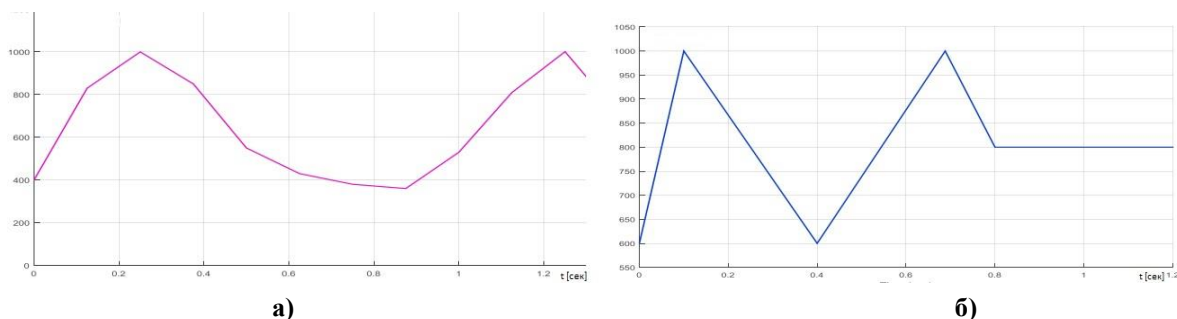


Слика 3.4. Функције улаза и излаза контролера на бази фази логики [29]

Концепт Р&О (енгл. *Perturb and Observes*) методе се заснива на примени мале промене радне тачке претварача на који је повезан ФН панел тако да радна права погоди МРР тачку. Промена струје коју претварач повлачи из ФН панела као последицу има промену напона ФН панела. Велика промена доводи до брзог постизања МРР са осцилацијама у стабилном стању. Мањи корак може смањити осцилације око МРР, али ће временски одзив бити повећан.

Алгоритам предложен у [29] је комбинована МРРТ техника са контролером на бази фази логики и Р&О методе како би се обезбедила величина корака ($d_{\alpha\alpha}$) за израчунавање фактора испуне. Смањењем вредности $d_{\alpha\alpha}$, осцилације око МРР се знатно смањују. На овај начин се добија нова МРРТ метода која прави бољи компромис између времена одзива и осцилација око вредности напона фотопанела за коју се има максимална снага.

Да би се илустровале предности предложене методе и повећање ефикасности у условима брзе промене зрачења, симулирана су два различита профила приказана на слици 3.5. Синусоидални профил варира од 400 W/m^2 и 1000 W/m^2 као што је приказано на слици 3.5 а), а троугласти профил се састоји од повећања од 600 W/m^2 до 1000 W/m^2 , а затим поновног смањења на 600 W/m^2 као што је приказано на слици 3.5 б).



Слика 3.5. Профили зрачења а) синусоидални б) троугласти [29]

Да би се проценила перформанса праћења МРРТ методе, описане у раду [29], израчунава се ефикасност која је изражена као:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{MPPT} dt}{P_{max} \Delta t}, \quad (3.7)$$

где је t_1 време покретања оптимизационог метода, t_2 време заустављања, а Δt временски интервал $t_2 - t_1$. P_{MPPT} је излазна снага ФН панела добијена помоћу МРРТ технике, а P_{max} је теоретска максимална излазна снага ФН панела.

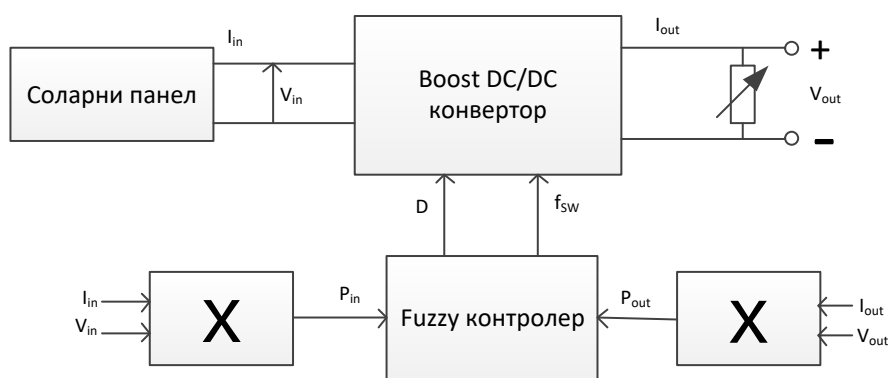
Табела 3.4 показује ефикасност праћења сваке МРРТ технике за оба тестирана профила зрачења, израчуната на основу једначине 3.7. Доказана ефикасност предложене методе је 99%.

Табела 3.4. Ефикасност МРРТ технике [29]

МРРТ техника	Синусоидални профил	Троугласти профил
<i>Perturb and Observe</i>	95.36%	97.34%
Фази логика	95.51%	96.58%
Комбинација МРРТ и Фази логике	99%	99.15%

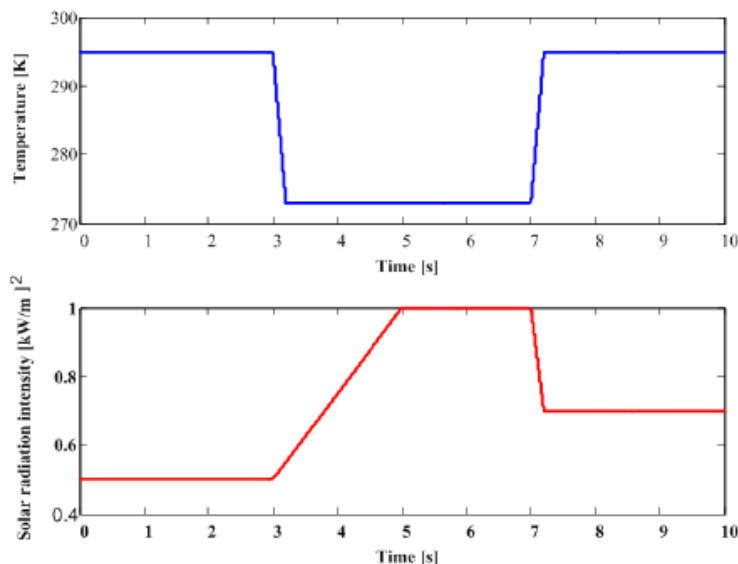
Приказаном комбинацијом метода одређује се смер праћења тачке максималне снаге, брза конвергенција и занемарљиве осцилације око МРР-а. Упоређивањем методе у којој се примењују фази логика и *Perturb and Observe* закључено је да се комбинацијом две методе добија прецизније праћење МРР тачке и да је ефикасност побољшана до 99% у односу на примену појединачних метода.

У раду [30] је представљен фотонапонски систем високе ефикасности са фази логичким контролером. Систем се састоји од ФН панела, подизача напона (*boost DC/DC* претварач) и потрошача на којем је напон 24 Vdc. Управљачки модул је реализован контролером на бази фази логике. Контролер управља фактором оптерећења и фреквенцијом управљачког сигнала претварача. На овај начин се остварују две важне функције. Једна је управљање излазним напонем ФН панела, као би се задовољило праћење тачке максималне снаге (MPPT алгоритам). У зависности од температуре и интензитета сунчевог зрачења мења се радна тачка претварача на који је повезан ФН панел. Променом радне тачке мења се радна права оптерећења тако да погоди MPP тачку. Друга функција регулатора је побољшање ефикасности претварача. Функционалност предложеног модела приказаног на слици 3.6 тестирана је компјутерским симулацијама применом софтвера МАТЛАБ и на лабораторијском прототипу.

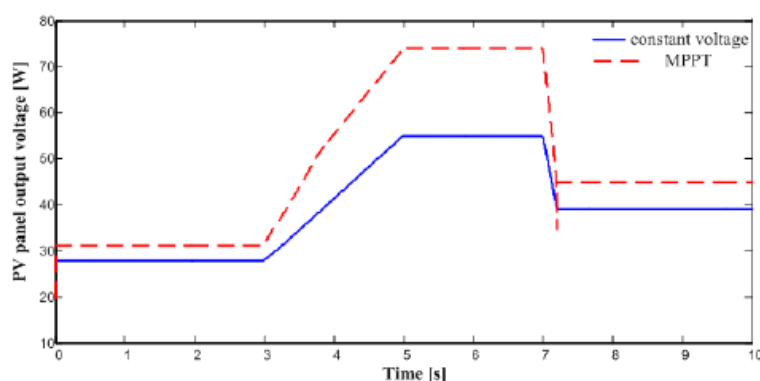


Слика 3.6. Блок шема фотонапонског система на бази фази логике [29]

Графички приказ снаге ФН панела када се примењује MPPT алгоритам и за константан излазни напон $V_{po}=0,7V_{oc}$ (V_{oc} је напон отвореног кола за коришћени ФН панел) и специфициране услове рада (слика 3.7) приказан је на слици 3.8.



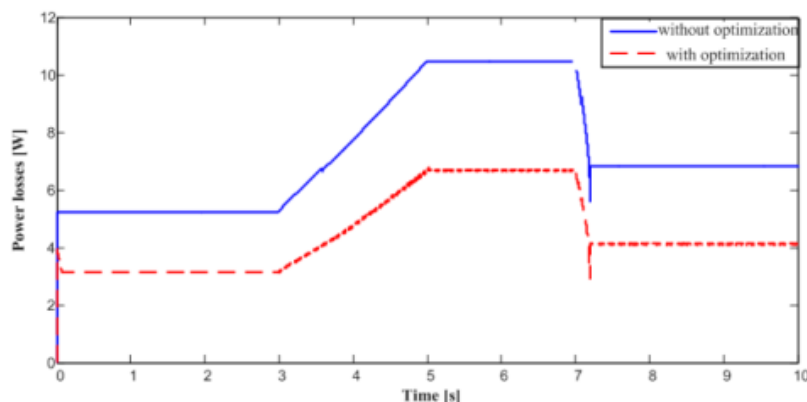
Слика 3.7. Температура и зрачење ФН панела [30]



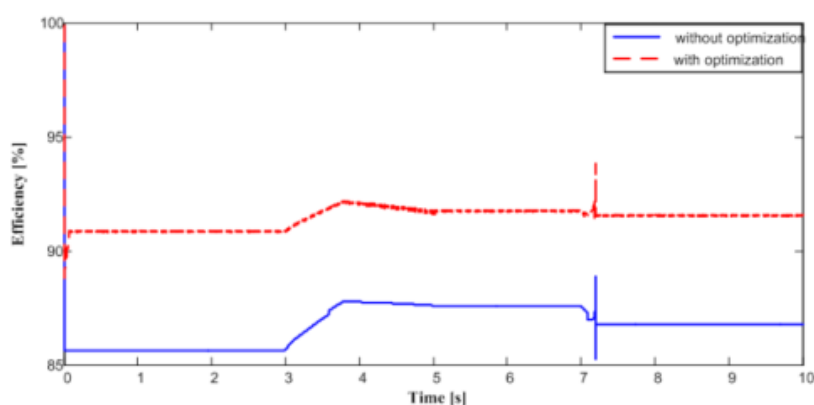
Слика 3.8. График излазне снаге ФН панела [30]

На основу слике 3.8 може се закључити да је предложени МРРТ алгоритам брз и за дате услове рада добија се максимална снага на излазу фотонапонског панела. Омогућена је и брза промена излаза при промени улазних параметара.

Ефикасност контролера подизача напона у фотонапонском систему је тестиран симулацијама применом софтвера МАТЛАБ и на лабораторијском прототипу. Добијени резултати за константну фреквенцију укључивања и са примењеним алгоритмом оптимизације ефикасности приказани су на сликама 3.9 и 3.10.



Слика 3.9. Губици снаге са и без оптимизације [30]



Слика 3.10. Ефикасност претварача са и без оптимизације [30]

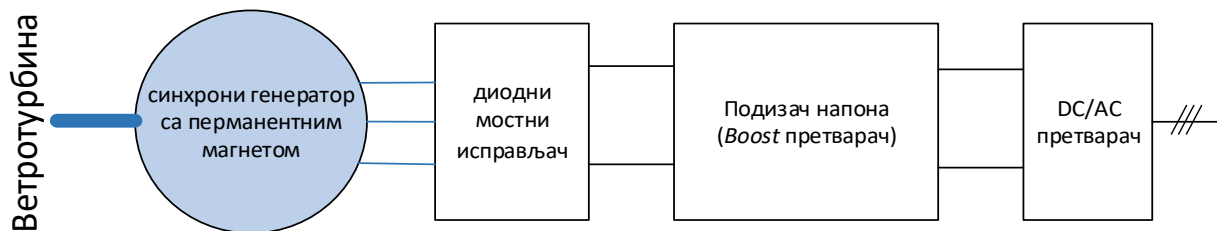
3.3. Системи са ветроагрегатом

Проширење класичног ПИД контролера је нелинеарни синергетски контролер за ефикасно искоришћење расположиве енергије ветра променљиве брзине описан у [31]. Предложена разломачка нелинеарна синергетска управљачка шема укључује:

- (1) регулацију брзине ротације ветроагрегата за добијање максималне снаге преко DC/DC претварача;
- (2) Регулацију реактивне снаге, управљањем компоненти струје DC/AC претварача.

Регулатори разломачног реда представљају алтернативна решења конвенционалним контролерима због додатног параметара као што је подесиви нецелобројни ред диференцијације/интеграције како би се прецизније пратила нелинеарна динамика система. Према томе, подешавање система разломака може да обезбеди оптималан динамички одговор.

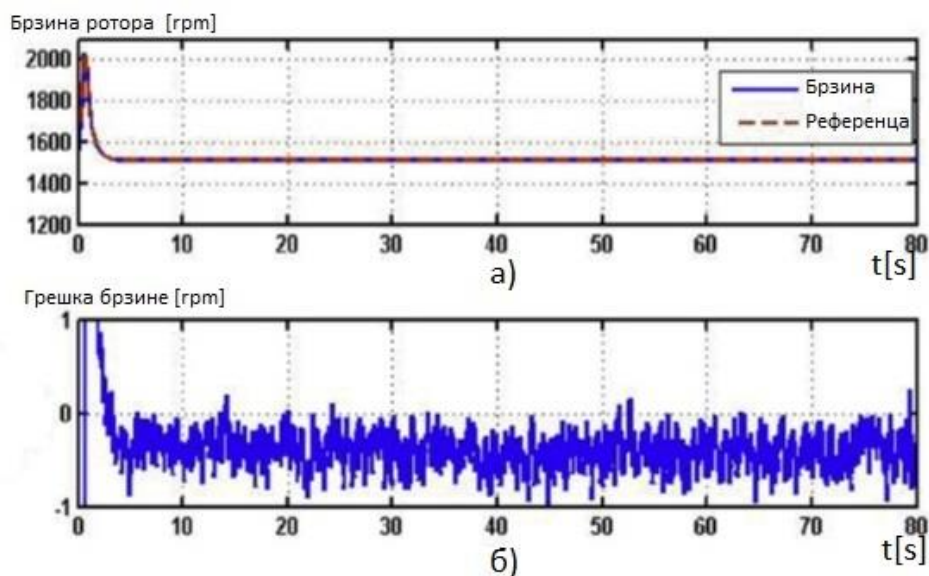
Систем претварања енергије ветра, описан у [31], приказан је на слици 3.11, где је синхрони генератор са перманентним магнетом повезан са мрежом преко три претварача: диодног мостног исправљача, DC/DC претварача и DC/AC претварача.



Слика 3.11. Систем претварања енергије ветра [31]

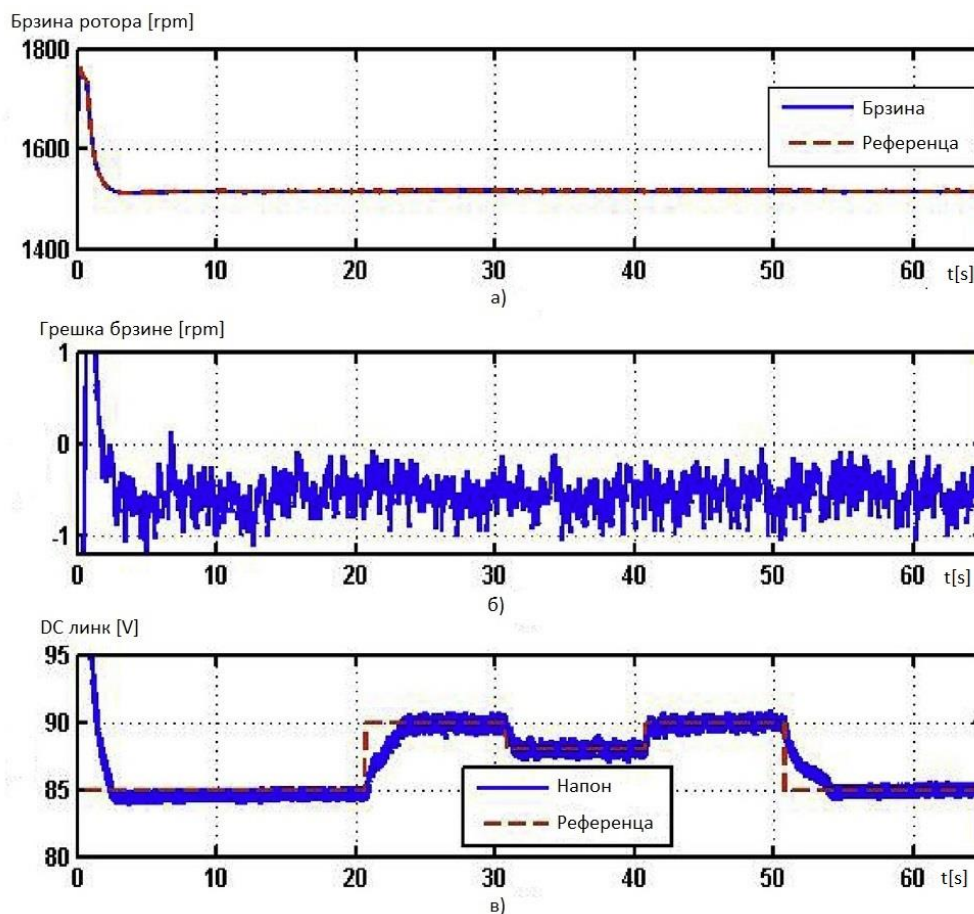
Да би се обезбедила максимална снага из ветротурбине, струја DC/DC претварача се регулише тако да прати оптимизовану референтну струју, на основу система за праћење тачке максималне снаге (MPPT).

Прво је тестирана разломачка синергетска управљачка шема при константном брзином ветра (ротора) и константном референтном референцом напона једносмерног међукола. Реакција брзине приказана на слици 3.12. а, и грешка брзине, на слици 3.12. б, показују успешно праћење референце применом предложене методе управљања.



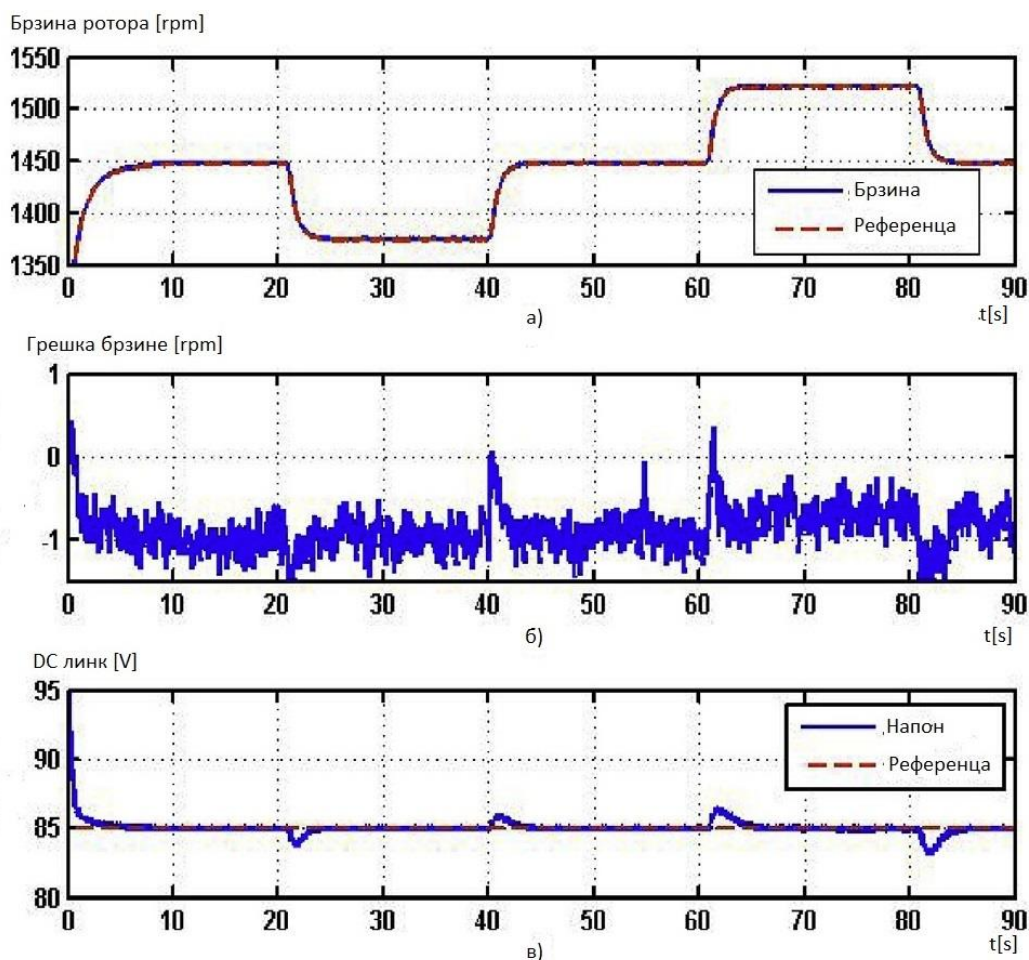
Слика 3.12. Управљање перформансама под константном брзином и константним напонем DC везе (а) референтна и измерена брзина, (б) грешка брзине [31]

Експериментални резултати са константном брзином ветра и променљивим референтним напоном приказани су на слици 3.13. Управља се брзином да буде константна као што је приказано на слици 3.13. а, а грешка брзине је илустрована на слици 3.13. б. Напон једносмерног међукола, приказан на слици 3.13. ц, прати варијације референтног напона са нултом грешком у стационарном стању.



Слика 3.13. Карактеристични таласни облици при константној брзини и променљивом напону једносмерног међукола
(а) референтна и измерена брзина, (б) грешка брзине, (в) регулација напона једносмерног међукола [31]

Предложени систем управљања је тестиран са променљивом брзином ветра и константним напонам. Брзина ротора прати брзину динамометра, коју генерише емулатор ветротурбине, као што је приказано на слици 3.14 а. са грешком приказаном на слици 3.14 б. Напон једносмерног међукола се успешно регулише тако да прати константну референцу, као што је приказано на слици 3.14 ц. Под утицајем промене брзине ротора напон једносмерног међукола се у кратком временском интервалу (2 до 3 секунде) промени у односу на референцу. Деловањем контролера, напон се коригује и одржава константним до следеће промене.



Слика 3.14. Карактеристични таласни облици при променљивој брзини и константном напону једносмерног међукола
(а) референтна и измерена брзина, (б) грешка брзине, (в) регулација напона једносмерног међукола
[31]

3.4. Гориве ћелије као извори енергије

Сprovedено је неколико студија како би се интегрисали системи засновани на горивим ћелијама са обновљивим изворима енергије и тако развили флексибилнији и ефикаснији енергетски системи. Гориве ћелије претварају хемијску енергију ускладиштену у водонику и кисеонику у електричну енергију и све се више користе у производњи електричне енергије, транспорту и у неким практичним применама. Међутим, излазни напон гориве ћелије је низак па се излаз гориве ћелије повезује на претварач.

Примена гориве ћелије је доказано високо ефикасан електрохемијски метод директног претварања хемијске енергије у електричну енергију чиме се значајно побољшава ефикасност система напајања. Поред тога, знатно је мање загађење ваздуха у односу на коришћење нафте и других фосилних горива. У раду [32] анализирана је примена горива ћелије у различитим областима. Показано је да интеграција гориве ћелије са другим обновљивим изворима енергије може да да добре резултате у погледу енергетске ефикасности.

Постоје различите врсте технологија горивних ћелија у којима се користе различите врсте материјала. Сви типови горивних ћелија имају скоро исте карактеристике, немају покретних делова, имају високу ефикасност и ниску емисију зрачења. Радне температуре варирају од амбијенталне до 900°C, у зависности од коришћене технологије горивних ћелија и врсте материјала који се користи. Примене гориве ћелије се крећу од оних веома малих, које производе само неколико W, до великих дистрибуираних система за производњу енергије од стотина MW. У табели 3.5 приказане су различите врсте горивних ћелија и њиховне основне карактеристике.

Табела 3.5. Карактеристике различитих врста горивих ћелија [32]

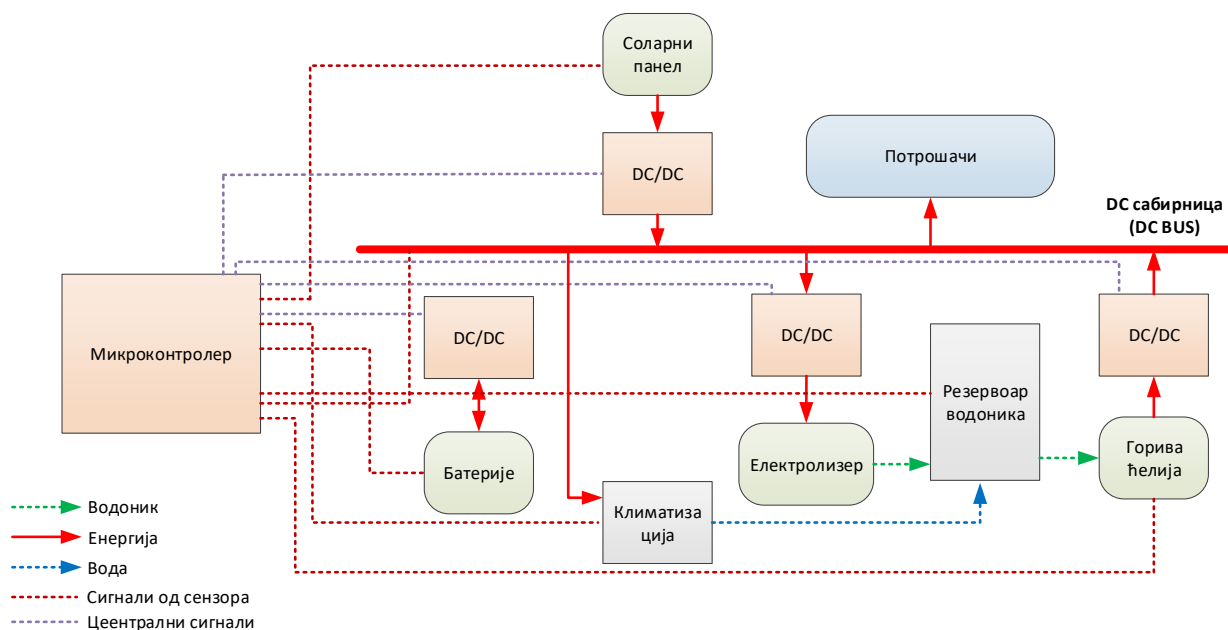
	AFC	MCFC	PAFC	PEMFC	SOFC
Врста електролита	Калијум хидроксид (<i>Potassium Hydroxide</i>)	Течни карбонат (<i>Liquid Molten Carbonate</i>)	Течна фосфорна киселина (<i>Liquid Phosphoric Acid</i>)	Полупропусна мембрана (<i>Ion Exchange Membrane</i>)	Керамика (<i>Ceramic</i>)
Радна температура	60 - 90°C	650°C	200°C	80°C	650 - 900°C
Ефикасност	45% - 60%	45% - 60%	35% - 40%	40% - 60%	50% - 65%
Снага	до 20 kW	> 1 MW	> 50 kW	до 250 kW	>200 kW
Примена	Свемирски бродови, подморнице	Електране	Електране	Возила	Електране

SOFC (енгл. *Solid oxide fuel cell*) је једна од најбољих врста гориве ћелије за производњу енергије за дистрибуиране системе може да се користи као извор енергије у руралним и удаљеним областима и не захтева значајна улагања у инфраструктуру електричне мреже. Такође, SOFC се користи и за топлотне системе како би се повећала ефикасност сагоревања кисеоника. Претварањем у електричну или топлотну енергију са високом ефикасношћу смањује се утицај стаклене баште у целом животном циклусу више него што је то код осталих конвенционалних технологија [32].

Горива ћелија се обично користи у соларној електрани за смањење флукуације излазне снаге. У конфигурацији, гориве ћелије и ФН панела, горива ћелија се може користити за производњу енергије током ноћи или током облачних дана.

Систем микро мреже може бити у једносмерном или наизменичном режиму, а применом одговарајућег интерфејса за управљање уређајима енергетске електронике међусобно се повезују извори енергије, оптерећење и различити системи за складиштење енергије. У раду [33] анализирају се карактеристике система микро мреже који се заснива на једносмерном систему преноса енергије и складиштењу енергије коришћењем водоника (слика 3.15). Аутори рада развили су математички модел за теоријско предвиђање перформанси у смислу енергетске анализе целокупног система и карактеристика пуњења/пражњења јединице за складиштење водоника. У табели 3.6 приказани су

параметри пројектованог система, где је x однос излазне и називне снаге, а η је ефикасност изражена у % и приказана на слици 3.16 [33].



Слика 3.15. Микро мрежа на једносмерном нивоу преноса енергије [33]

Табела 3.6. Параметри пројектованог система [33]

/	Снага	Ефикасност DC/DC претварача	Ефикасност DC/AC претварача
ФН панел (инвертор/конвертор)	5 kW	за $0 \leq x < 0.01$ $\eta = 6000x$	за $0 \leq x < 0.05$ $\eta = 1850x$,
Горива ћелија (инвертор/конвертор)	1 kW	за $0,01 \leq x \leq 1$ $\eta = -2266.5x^6 + 8073x^5 - 11430x^4 + 8184.7x^3 - 3110.8x^2 + 593.23x + 53.258$	за $0.05 \leq x < 0.10$ $\eta = 1.0395x + 0.048$
Електролизер (исправљач/конвертор)	600 W		за $0.10 \leq 0.10 \times \leq 1$ $\eta = 16.617x^5 - 68.077x^4 + 106.03x^3 - 80.831x^2 + 29.338x + 94.121$
Батерија (инвертор/конвертор)	5 kW		
Климатизација (хлађење/грејање)	250/500 W		

Ефикасност гориве ћелије и електролизера рачуна се према једначинама 3.8 и 3.9.

$$\eta_{FC} = \frac{I_{FC} V_{FC} \eta_{FCI}}{m_{FC} LHV_{H_2}}. \quad (3.8)$$

$$\eta_{EL} = \frac{m_{EL} LHV_{H_2}}{I_{EL} V_{EL}}. \quad (3.9)$$

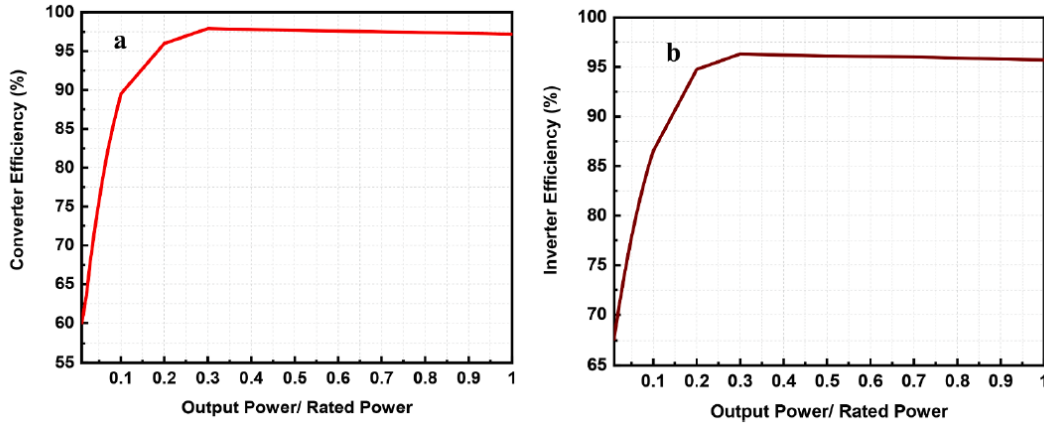
Укупна ефикасност приказаног система рачуна се према формулама 3.10 и 3.11.

$$\eta_{\text{укупно}} = \frac{P_L + P_{EL}\eta_{EL} + P_{bat}\eta_C + P_{klim} + P_{bat}}{P_{PV}}, \quad (3.10)$$

када је снага ФН панела P_{PV} већа од снаге потребне потрошачима, односно

$$\eta_{\text{укупно}} = \frac{P_L}{P_{PV} + (P_{FC}/\eta_{FC}) + P_{klim} + (P_{bat}/\eta_d)}, \quad (3.11)$$

када је снага ФН панела P_{PV} мања од снаге потребне потрошачима.

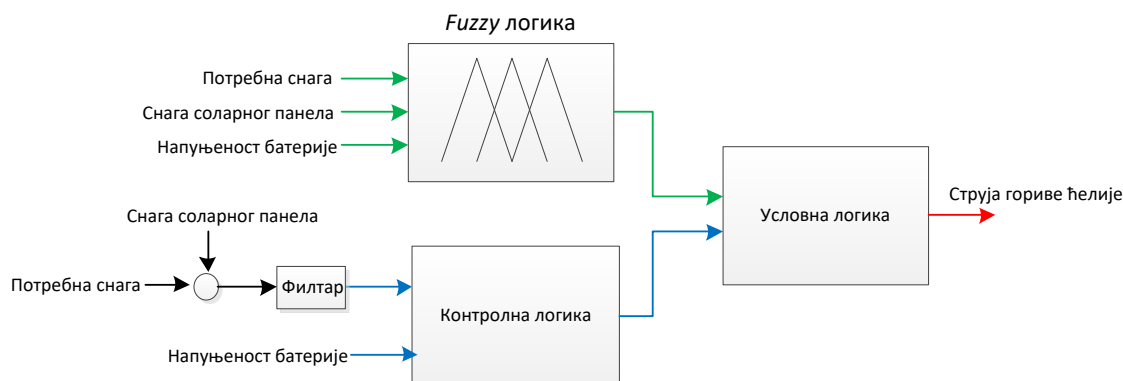


Слика 3.16. График ефикасности DC/DC претварача и DC/AC претварача [33]

Систем управљања напајањем који се бави питањима везаним за интеграцију обновљивих извора енергије, стабилност дистрибуције једносмерног напона, однос потребне и расположиве енергије као и променом оптерећења показује да је интеграција енергије добијене од ФН панела, гориве ћелије, електролизера и батерије погодна за напајање потрошача у променљивим радним условима као што су променљива производња енергије из ФН панела и честа промена оптерећења.

3.5. Хибридни системи напајања

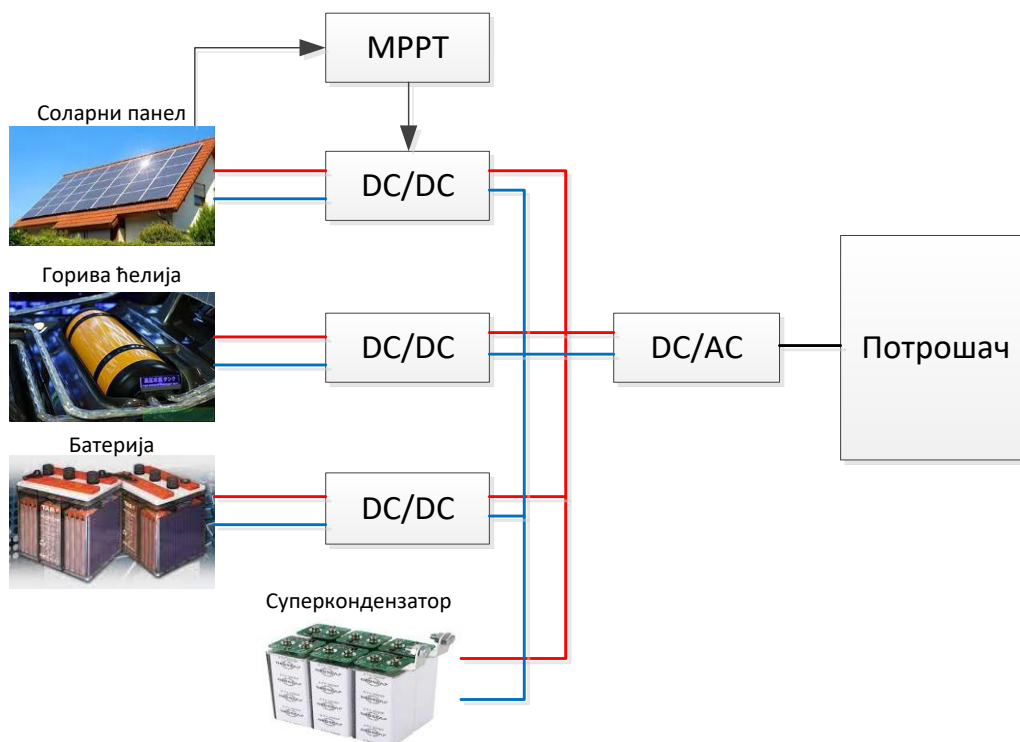
У хибридным системима напајања са обновљивим изворима енергије који садрже гориве ћелије и батерије, додатни циљеви су смањење потрошње водоника и контрола напуњености батерије. Ови параметри су неопходни да би се постигло максимално смањење трошкова, као и повећање животног века батерија и водоника. У раду [34] је описан нови хибридни систем управљања енергијом ХЕМС који успешно оптимизације трошкове и потрошњу горива, и смањује потрошњу водоника при коришћењу горивих ћелија. Блок дијаграм ХЕМС-а приказан је на слици 3.17.



Слика 3.17. Блок дијаграм управљачке логики [34]

Функција управљачке архитектуре је ефикасна расподела снаге електричних извора за напајање потрошача потребном енергијом. Хибридни систем се састоји од ФН панела, гориве ћелије, суперкондензатора и батерије за складиштење енергије (слика 3.18). ФН панел се користи као главни извор енергије када има дневног светла, а горива ћелија је секундарни извор који обезбеђује енергију када добијена енергија из главног извора није довољна. Батерија служи да обезбеди потребну енергију при већим оптерећењима, а суперкондензатор се користи у прелазним режимима и при брзој промени оптерећења. Пребацивање са једног на други извор енергије се врши аутоматски на основу унапред дефинисаних поступака да би се минимизовала потрошња водоника и омогућила максимална напуњеност батерије [34].

Извори напајања и системи за складиштење енергије повезани су на главну сабирницу једносмерног напона (DC сабирницу) паралелно преко DC/DC претварача (осим суперкондензатора). Управљачка електроника контролише расположиву снагу сваког извора и одржава ниво DC напона на унапред дефинисаној вредности. Суперкондензатор је повезан без претварача да би реакција на брзе промене оптерећења била задовољавајућа, у складу са карактеристикама суперкондензатора [34].



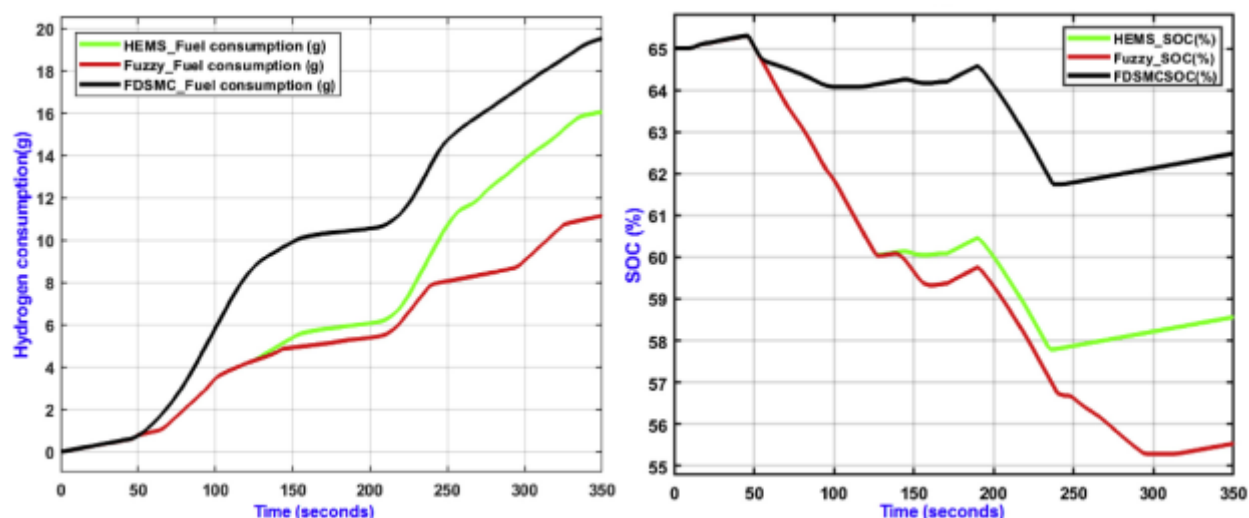
Слика 3.18. Хибридни систем напајања који садржи ФН панел, гориву ћелију, батерију и суперкондензатор [34]

Хибридна стратегија управљања подразумева коришћење стратегије фреквентног распрезања и коришћење машине стања начина управљања као и фази логике. Обе стратегије раде заједно као један систем за оптимизацију потрошње водоника и контролу напуњености батерије. Основна својства стратегије фреквентног распрезања је да смањи коришћење батерије, док је главна предност примене фази логике мања потрошња водоника.

Резултати поређења фази, стратегије променљиве фреквенције и хибридне стратегије управљања хибридног система напајања, приказаног на слици 3.18, представљени су у табели 3.7 и на слици 3.19. Упоредивањем потрошње водоника за предложену хибридную стратегију у односу на стратегију променљиве фреквенције постиже се 19,6% уштеде потрошње водоника док је вредности напуњености батерије повећана за 5,1% у односу на фази логику [34].

Табела 3.7. Резултати различитих стратегија управљања [34]

/	Хибридна стратегија	Фази логика	Стратегија променљиве фреквенције
Потрошња водоника [g]	16	11	19,9
Најнижа вредност напуњености батерије [%]	58,5	55,5	62,4

Слика 3.19. Резултати поређења различитих стратегија
а) потрошња водоника б) напуњеност батерије [34]

Излазна променљива када је примењено фази управљање приказано је на слици 3.20 према стањима описаним у табели 3.8 и фази правилима управљања приказаним у табели 3.9. Одабир стратегије (*diff*) приказан је на слици 3.20 (а), а на слици 3.20 (б) излаз стратегије фази управљања. Стратегија управљачке логике представљена је на слици 3.20 (ц), а хибридна стратегија управљања (управљачка логика) на слици 3.20 (д) [34].

Предложена конфигурација и хибридни систем напајања у раду [34] су имплементирани и симулирани применом софтвера МАТЛАБ/Симулинк.

Табела 3.8. Стање система [34]

Стање	Напуњеност батерије	Снага	Изназ
1	Висок	$P_{load} < P_{fcmin}$	$P_{fc}^* = P_{fcmin}$
2	Висок	$P_{load} \in [P_{fcmin}, P_{fcmax}]$	$P_{fc}^* = P_{load}$
3	Висок	$P_{load} \geq P_{fcmax}$	$P_{fc}^* = P_{fcmax}$
4	Нормал	$\& P_{load} < P_{fcopt}$	$P_{fc}^* = P_{fcopt}$
5	Нормал	$\& P_{load} \in [P_{fcopt}, P_{fcmax}]$	$P_{fc}^* = P_{load}$
6	Нормал	$\& P_{load} \geq P_{fcopt}$	$P_{fc}^* = P_{fcmax}$
7	Низак	$P_{load} < P_{fcmax}$	$P_{fc}^* = P_{load} + P_{char}$
8	Низак	$P_{load} \geq P_{fcmax}$	$P_{fc}^* = P_{fcmax}$

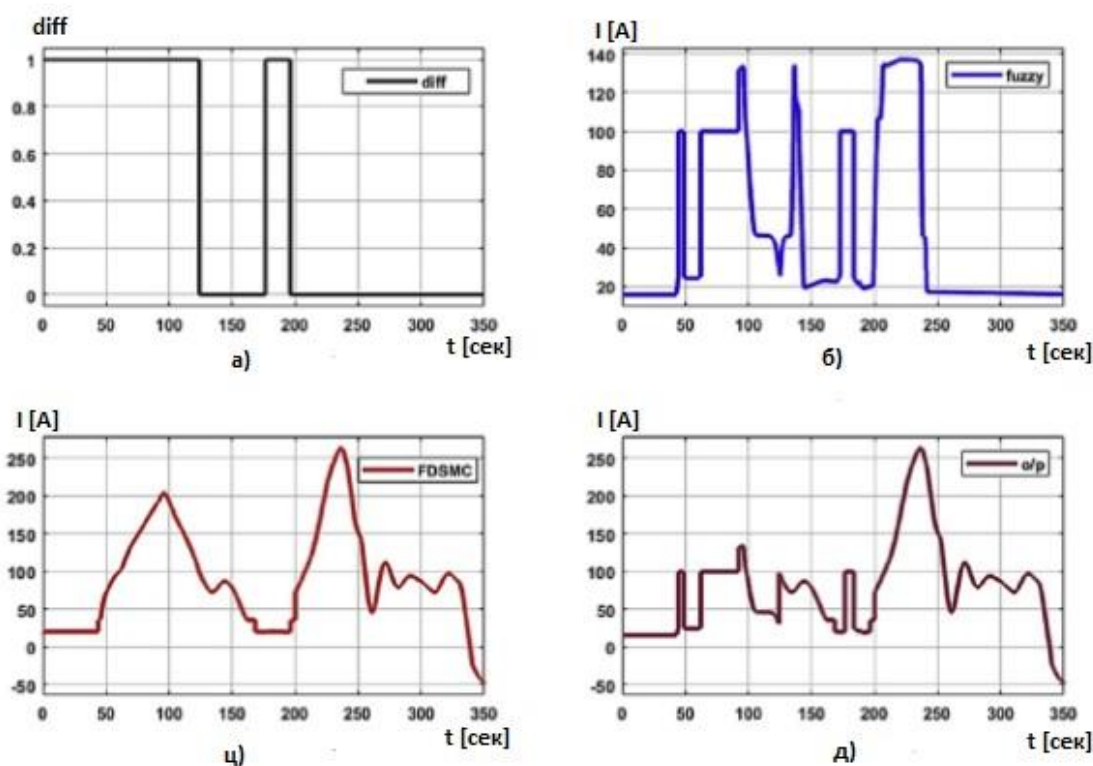
У табели 3.8 са P_{load} је означена снага неопходна потрошачима, а P_{char} је снага која је потребна за пуњење батерије. P_{fcmin} , P_{fcmax} и P_{fcopt} су минимална, максимална и оптимална вредност снаге коју даје горива ћелија. P_{fc}^* је вредност снаге гориве ћелије која се користи у зависности од стања система.

Табела 3.9. Правила фази управљања [34]

/	улаз			излаз
	Потрошња	Фотонапон	Напуњеност батерије	Струја гориве ћелије
1	Низак	Низак	ОК	Низак
2	ОК	Низак	ОК	ОК
3	ОК	ОК	ОК	Низак
4	Висок	Низак	ОК	Висок
5	Висок	ОК	ОК	Низак
6	Висок	Висок	ОК	Низак
7	Висок	Висок	Низак	Низак
8	Низак	Низак	Висок	Низак

Када је вредност напуњености батерије већа или једнака граничној вредности, сигнал за одабир стратегије је већи од нуле и фази стратегија је активна (од 0 до 125 и од 175 до 200 сек.). У овом случају, систем констатује да је батерија напуњена, а излаз ХЕМС-а је

излаз фази стратегије (слика 3.20 д). Када се вредност напуњености батерије смањи испод граничне вредности (од 125 до 175 s), сигнал за одабир стратегије је једнак нули, систем прелази на напајање из гориве ћелије како би одржао напон на батерији. У овом случају, излаз ХЕМС-а се аутоматски пребацио на стратегију управљања фреквенцијом што се види из графика на слици 3.20 д.



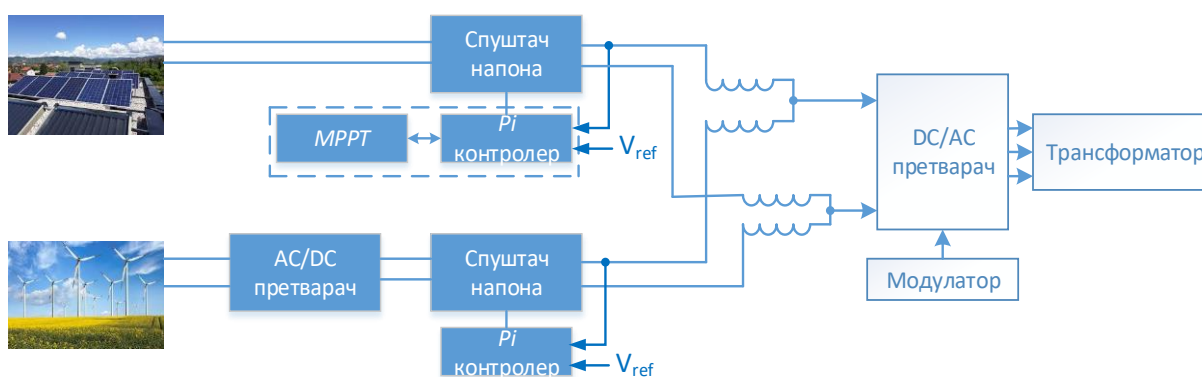
Слика 3.20. Графички приказ симулације стратегије хибридног система управљања [34]

Обновљиви извори енергије, као што су соларна енергија, енергија ветра, или мале хидроелектране представљају алтернативу за производњу електричне енергије у удаљеним подручјима, ван дистрибутивне мреже или за додатну производњу енергије која се повезује на дистрибутивну мрежу. У раду [35] описано је коришћење сунчеве енергије и енергија ветра као енергетских извора у таквом систему као што је приказано на слици 3.21. Предложени систем се састоји од три дела:

- 1) систем за претварање енергије ветра са синхроним генератором са сталним магнетом, мосним исправљачем и спуштачем напона са ПИ регулатором,
- 2) системом претварања соларне енергије који садржи ФН панеле, МРРТ и спуштач напона са ПИ регулатором, и

3) међуфазни трансформатор, пунмосни DC/AC претварач и трофазни трансформатор.

Електрична енергија добијена из ФН панела и ветроагрегата се преко два претварача повезује на DC сабирницу, а затим се преко DC/AC претварача повезује на електродистрибутивну мрежу. Други део за претварање енергије се састоји од DC/AC претварача који генерише трофазни наизменични напон контролисан ширинском модулацијом. Сабирнице на једносмерном нивоу омогућују стабилни рад система. Описани систем нема могућност складиштења енергије што смањује поузданост система. Показано је да хибридни енергетски системи у многим ситуацијама могу смањити укупне трошкове самосталним напајањем, док у исто време обезбеђују поузданије снабдевање електричном енергијом кроз комбинацију енергетских извора. Иако су обновљиви извори нестабилни и имају нелинеарну карактеристику у поређењу са нуклеарним и термо енергетским изворима, они немају негативан утицај на загађење животне средине, што им је велика предност. Истраживачи проучавају примену различитих обновљивих извора енергије у смислу позитивних и негативних ефеката за сваки извор појединачно, али и примену различитих хибридних система који примењују различите изворе енергије. Употреба хибридиних система напајања потекла је од чињенице да су обновљиви извори зависни од временских прилика и да је обично њихов степен корисног дејства мали. Истраживањем је установљено да је у хибридном систему неопходан акумулаторски елемент у којем ће се складиштити вишак енергије која ће затим бити коришћена при енергетском дефициту.

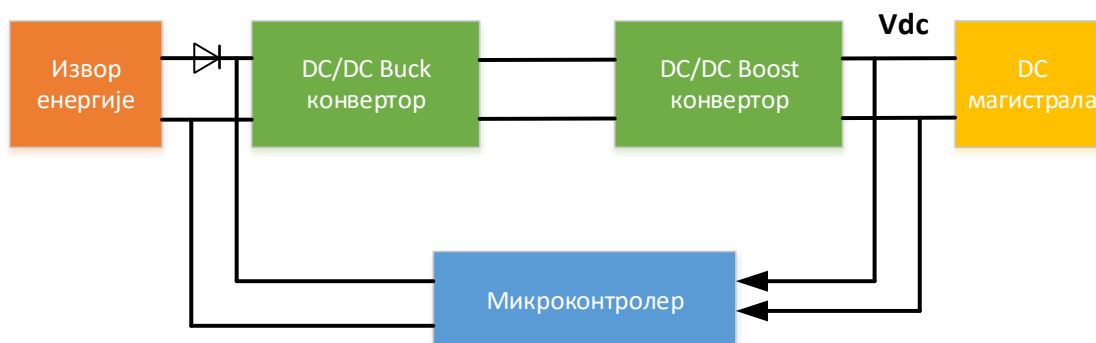


Слика 3.21. Хибридни систем напајања који садржи ФН панел и ветроагрегат [35]

Потреба за другачијом организацијом напајања потиче из чињенице да су губици у производњи и преносу енергије велики, да се потребе за енергијом повећавају и да је неопходно максимално искористити обновљиве изворе енергије (ветар, сунце, геотермална

енергија, енергија таласа). Електроенергетски системи засновани на обновљивим изворима енергије често се користе као додатни извори који се спајају на електроенергетску мрежу. Постоје и хибридни електроенергетски системи који су независни од централизоване електроенергетске мреже. Изоловани хибридни системи који се састоје од ФН панела, ветроагрегата и горивих ћелија, тренутно су најраспрострањенији [36, 37].

Нови хибридни систем обновљиве енергије описан у раду [37], заснован је на коришћењу различитих извора енергије од којих је један енергија таласа. Пуни потенцијал извора енергије омогућен је коришћењем брзог и веома прецизног контролера који управља инвертујућим спуштачем-подизачем напона (*Buck-boost DC/DC* претварач) и истовремено контролише максималну снагу која се може добити из извора. Блок шема контролера приказана је на слици 3.22. Претварач је пројектован да ради у опсегу напона од 4 до 200 V_{DC} , а излазни напон се стабилише на 12 V_{DC} . Сваки извор енергије описаног хибридног система повезан је на DC сабирницу. Систем садржи и акумулаторску батерију као помоћни извор напајања.



Слика 3.22. Повезивање извора напајања преко инвертујућег спуштача-подизача напона [37]

Енергија таласа се тренутно сматра једним од најперспективнијих обновљивих извора. Забележен је значајан развој у примени таласне енергије који је повећао ефикасност уграђивањем нових технологија. У раду [37], у генератору енергије таласа коришћен је двостепени *Savonius* ротор. Симулациони модел хибридног електроенергетског система моделован је коришћењем софтвера МАТЛАБ/Симулинк и експериментално верификован на различитим временским условима.

Снага таласа одређује се према формули 3.10 користећи вредности висине таласа, временски период трајања таласа, таласну дужину, коефицијет гравитације и коефицијент густине воде.

$$P_W = \frac{1}{16} \rho g H^2 \frac{\lambda}{T} b \left[1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\sinh \frac{4\pi h}{\lambda}} \right] \quad (3.10)$$

где је ρ густина воде $998 \frac{Kg}{m^3}$,

g коефицијент гравитације $9,81 \frac{m}{s^2}$,

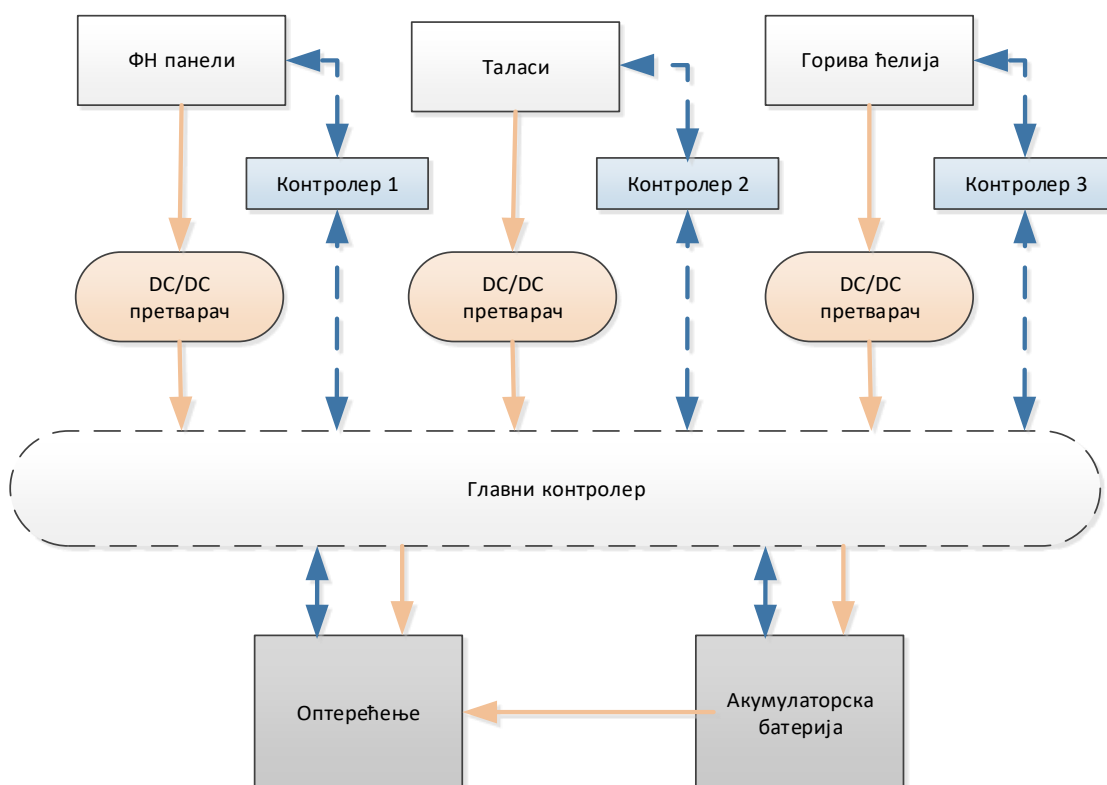
H висина таласа,

λ таласна дужина,

T временски период трајања таласа,

b је ширина ротора (1 m).

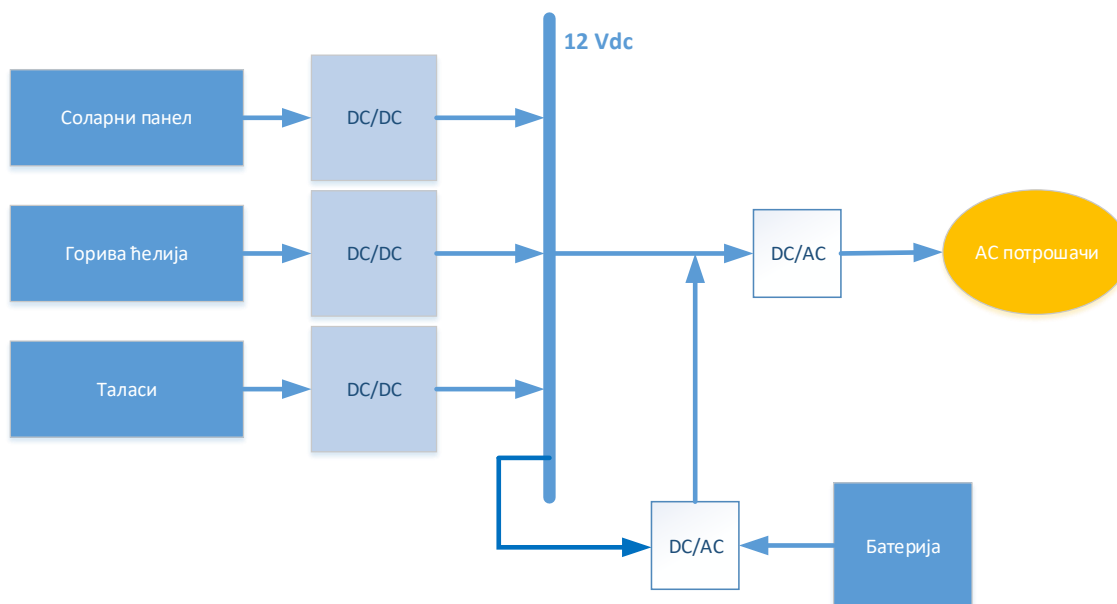
Коришћени главни контролер управља расположивом енергијом, анализирајући три извора енергије, оптерећење и батерију што је приказано блок дијаграмом на слици 3.23.



Слика 3.23. Блок дијаграм хибридног система напајања [37]

Информације које добије од сваког извора енергије и батерије регулише пренос енергије из три извора и оптерећења и одређује вишак енергије који ће се складиштити у батеријама. На основу ових сигнала, одређује се енергија потребна за напајање потрошача и складиштење оперативне резерве која ће се користити када постоји енергетски дефицит. Сигнали се, преко контролера који упоређује напон сваког извора са жељеним напонам, шаљу претварачу како би се регулисао излазни напон.

Тестирањем са три извора напајања, добијени су резултати који су потврдили ефикасност главног контролера, његову способност да интегрише рад три извора као и брзину реаговања. Блок шема повезивања извора напајања и потрошача преко сабирнице на 12 V_{DC} приказана је на слици 3.24. Када је оптерећење мало и три извора ефикасно раде, два извора напајају потрошаче, а трећи служи за пуњење батерије. У супротном, када на једном извору нема излазног напона, батерија се укључује у систем како потрошачи не би осетили недостатак енергије.

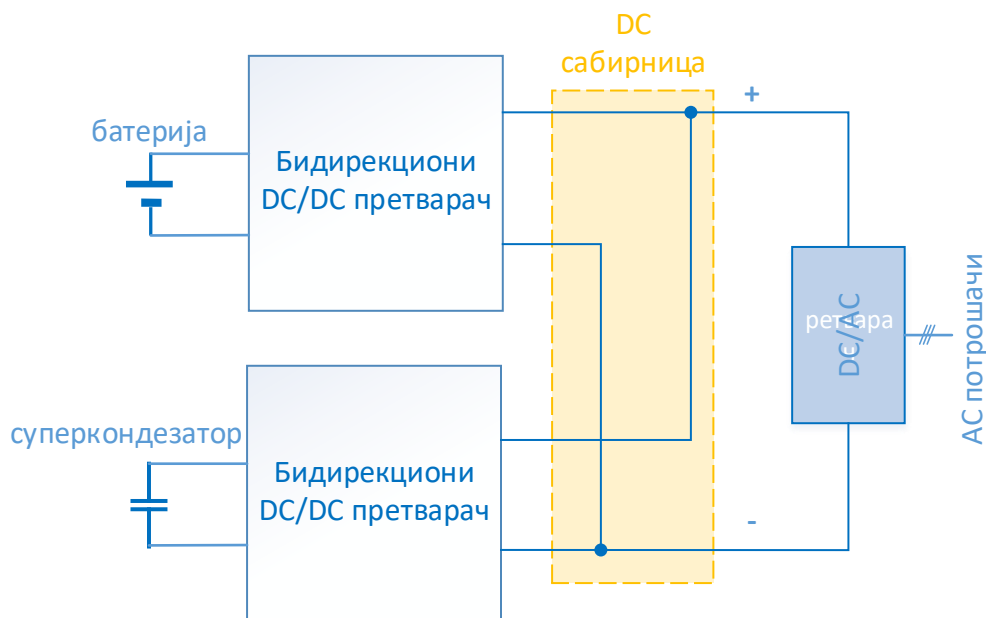


Слика 3.24. Хибридни систем напајања употребом енергије сунца, гориве ћелије и енергије таласа [37]

Присуство више од једног система за снабдевање или складиштење енергије захтева контролу тока енергије између различитих извора. Стога су оптимизација компоненти и усвајање стратегије управљања енергијом (EMS) од значаја за смањење трошкова система и ограничавање његових негативних ефеката. Стратегија управљања енергијом је обично интегрисана са оптимизацијом како би се обезбедило поуздано напајање потрошача и

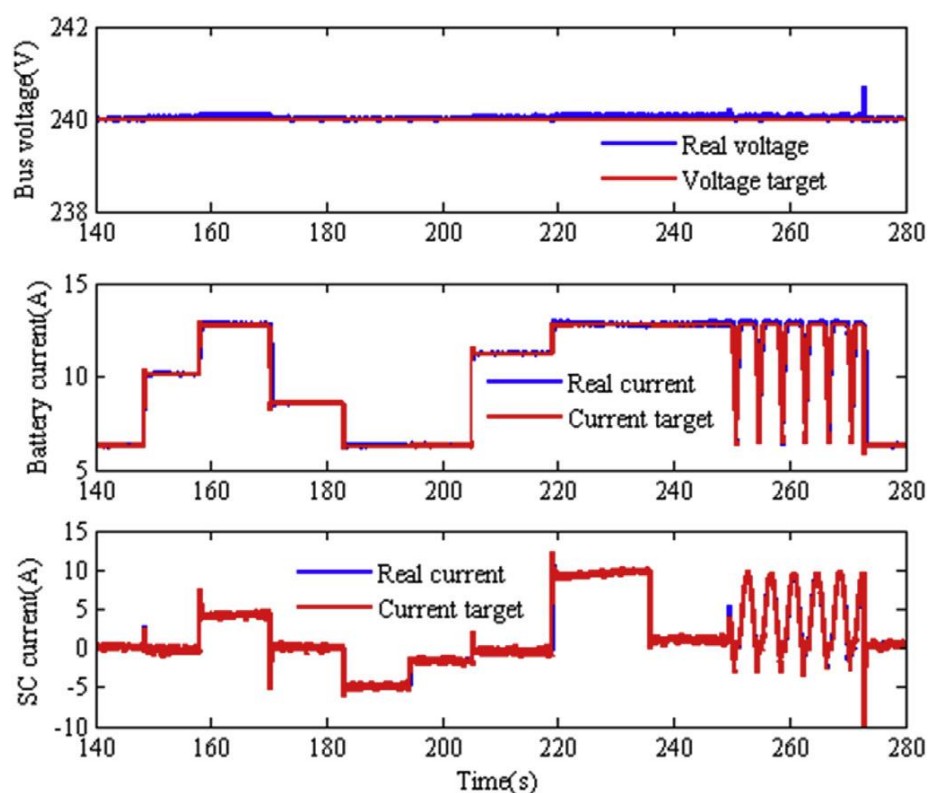
смањили трошкови производње електричне енергије [38]. Прикупљањем података о стању система, те у зависности од тренутне расположиве електричне енергије постављају се референтне вредности које одређују коришћење одређеног извора напајања, или струју пуњења батерије како би се задовољиле потребе потрошача. Стратегија управљања енергијом зависи од врсте енергетског система, расположивих извора напајања и коришћене опреме.

У раду [39] је предложена стратегија управљања активног хибридног система за складиштење енергије, који користи два бидирекциона DC/DC претварача за раздвајање суперкондензатора и батеријског низа од DC сабирнице (слика 3.25). Контрола струје батерије, струје суперкондензатора, као и напон DC сабирнице, регулише се коришћењем два DC/DC претварача и контролера заснованог на алгоритму клизног режима. Референтна вредност струје батерије се генерише стратегијом управљања енергијом (EMS), док референтну вредност струје суперкондензатора генерише контролер како би се обезбедио стабилан напон на DC сабирници.



Циљ предложеног контролера је постизање константне вредности струје пуњења батерије, струје суперкондензатора и напона DC сабирнице. Фактор испуне два DC/DC претварача подешава се на два контролна улаза.

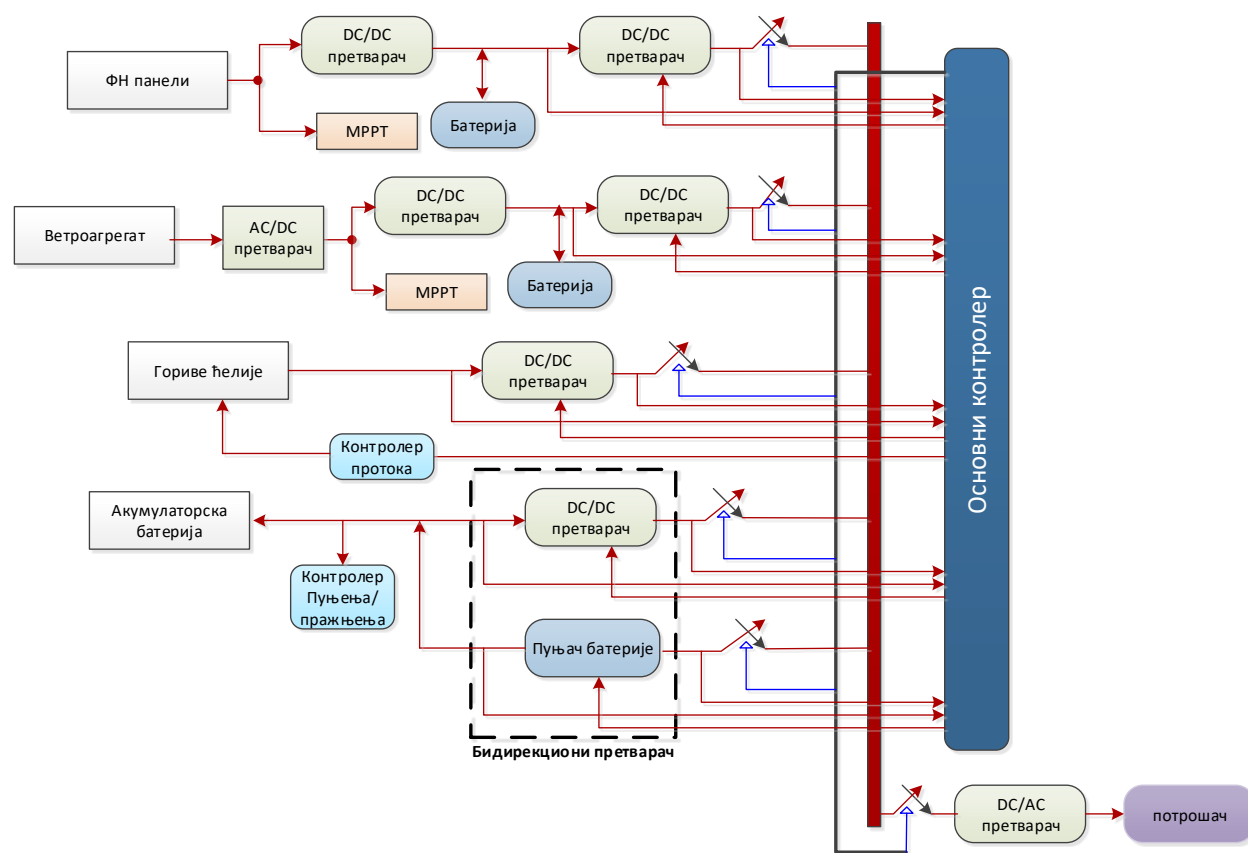
Експеримент приказан у раду [39] показује да струја батерије и струја кондензатора прате жељене вредности са благим прелазом када се оптерећење промени. Излазни напон и струје батерије/суперкондензатора су увек око жељених референтних вредности. Слика 3.26 показује да радни циклуси два DC/DC претварача имају брзи одговор према референтним вредностима за струју батерије које генерише EMS и референтним вредностима за струју суперкондензатора које генерише контролер заснован на клизном режиму. Резултати симулације и експеримента показују да предложени метод управљања има задовољавајуће перформансе, укључујући праћење када снага оптерећења варира што је приказано на слици 3.26. Такође, предложени контролер се може комбиновати са различитом контролном логиком [39].



Слика 3.26. Упредни резултати циљних и измерених величина (напон, струја батерије и струја суперкондензатора) [39]

На слици 3.27 приказан је начин повезивања хибридног система напајања који користи енергију сунца, енергију ветра и енергију добијену из гориве ћелије [40]. Батерија служи за одржавање стабилности и акумулацију енергије. Блок шема приказана на слици 3.27 представља модел паралелног повезивања различитих извора енергије. Приказано решење

има шест DC/DC претварача, један AC/DC претварач и један DC/AC претварача за прилагођавање AC потрошачима или повезивање на електродистрибутивну мрежу. Коришћењем MPPT алгорита може се добити на повећању ефикасности и омогућити максимално искоришћење расположиве снаге. На слици 3.27 може се приметити да је сваки извор енергије праћен са минимално два претварања напона да би се напајали потрошачи који користе AC напон за напајање. У поређењу са раније анализираном литературом, у раду [39] се користе подизачи напона (*boost* DC/DC претварачи).

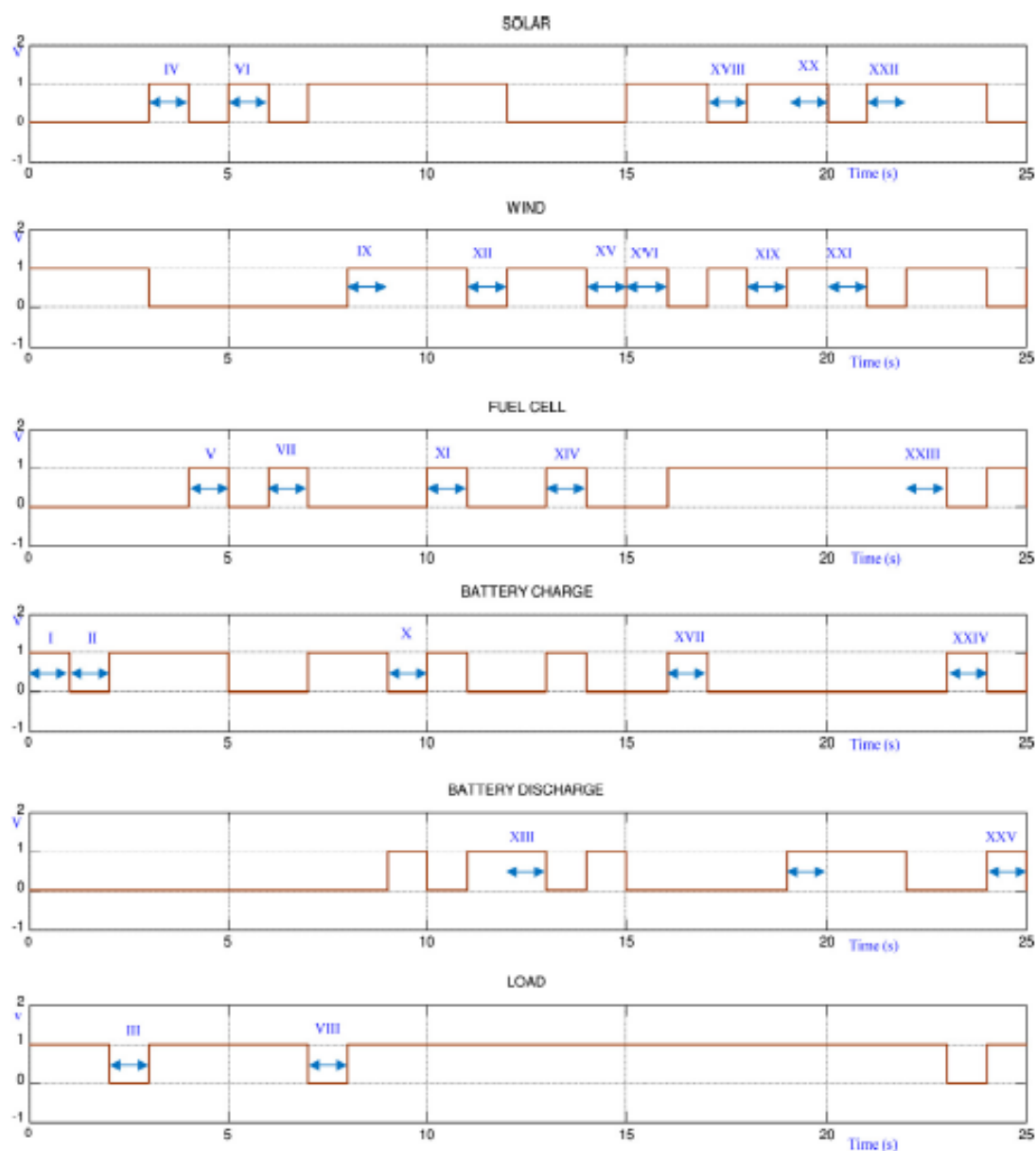


Слика 3.27. Хибридни систем напајања употребом енергије сунца, ветра и гориве ћелије [40]

Уграђени контролер је програмиран за одржавање константног напона на DC сабирници. На основу електричне енергије која се добија из сваког расположивог извора, контролер регулише коришћење електричне енергије како би потрошачи имали стабилан напон и довољно енергије за несметан рад. Уколико дође до промене у оптерећењу, референтна вредност извора се подешава за сваки извор променом фактора испуне. Контролер прати енергију сваког извора и упоређује је са потребном енергијом. Контролер контролише и стање батерије, водећи рачуна о струји пуњења и минималном напону

пражњења. Приоритетни извори су ветар и сунце, а уколико нема довољно енергије у овим изворима укључује се горива ћелија, или батерија [40].

На основу снаге коју испоручују извори, контролер комбинује изворе на неки од могућих 25 начина како би се обезбедила потребна енергија потрошачима. На слици 3.28 приказани су графици који приказују различита комбиновања вредности извора напајања.



Слика 3.28. Могуће комбинације извора напајања за обезбеђење довољне енергије за потрошач [40]

Када је напон подешен на референтну вредност на DC сабирници, контролер упоређује струју потребну потрошачима са струјом ФН панела и ветроагрегата као у једначини (3.12). Струја ФН панела је пропорционална снази коју генерише ФН панел на референтној вредности напона. Када I_L задовољава једначину (3.12), управљање струјом претвараача повезаних са ФН панелом и ветроагрегатом се подешавају према једначинама (3.13) и (3.14).

$$I_{Sref} + I_{Wref} > I_L, \quad (3.12)$$

$$I_{Sref} = \frac{P_S}{V_{ref}}, \quad (3.13)$$

$$I_{Wref} = \frac{P_W}{V_{ref}}, \quad (3.14)$$

где је: I_L струја потрошача,

I_{Sref} струја ФН панела,

I_{Wref} струја ветроагрегата,

P_S снага на излазу ФН панела,

P_W снага на излазу ветроагрегата,

V_{ref} референтни напон.

Систем хибридног напајања, описан у [40] са контролером који омогућава стабилан излазни DC напон, се показао стабилан са веома добром реакцијом при брзим променама оптерећења.

3.6. Софтверски алат примењен у хибридним системима напајања

Постоје и различити софтверски алати који врше конфигурисање хибридног система на основу улазних параметара, односно на основу расположивих извора енергије. Додатни параметри за конфигурисање система су и просечне вредности сунчеве светлости на месечном и годишњем нивоу, просечне месечне и годишње вредности брзине ветра, варијација ветра у односу на годишње доба као и максимална вредност потребне енергије за снабдевање потрошача. Анализом типичног хибридног система напајања који садржи ФН панел, ветроагрегат, дизел генератор и акумулатор закључено је да комбинација

паралелног везивања извора енергије и батерије обезбеђује поуздано и ефикасно напајање потрошача [41-43].

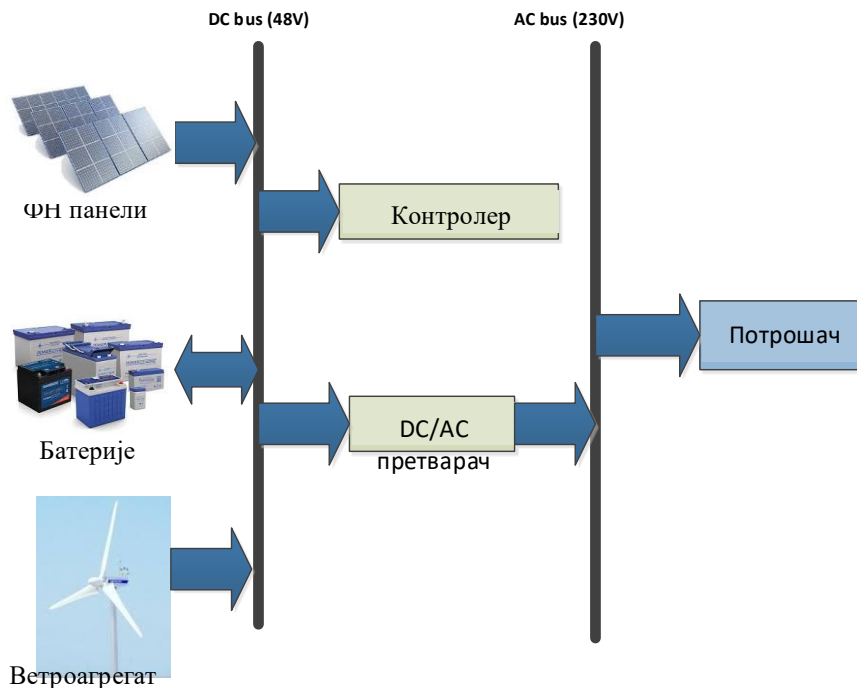
ХОМЕР (енгл. *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*) је софтвер за оптимизацију дизајна микромрежа. Софтверски производ омогућава ефикасно моделовање система који користе ФН панеле, ветроагрегате, батерије, дизел агрегате итд. Могуће је симулирати систем за различите комбинације извора напајања. Софтвер ХОМЕР може да се користи за израчунавање дневног сунчевог зрачења и просечне брзина ветра како би се оптимално димензионисао систем на одређеној локацији. Димензионисањем система могуће је израчунати економску исплативост и оптимизовати систем.

ХОМЕР је општи софтвер за планирање и истраживање хибридних извора. Такође, анализом параметара система, може да се процени да ли су извори енергије адекватни, који извори енергије имају најбољу економску исплативост, који су трошкови система итд. Улазни параметри софтвера могу бити снага ФН панела, снага оптерећења, карактеристике дизел генератора, технички детаљи, цене и ограничења система, на основу чега ХОМЕР може израчунати сатни енергетски биланс упоређивањем оптерећења са енергијом коју електрични систем може да снабдева у сваком тренутку. За моделе који садрже батерије, ХОМЕР одређује, за сваки сат, карактеристике батерије, потреба за пуњењем или пражњењем. Моделовањем перформанси посматраног система може да израчуна цену животног циклуса која укључује трошкове инсталације и рада за изоловане системе, а и за моделе повезане на мрежу. ХОМЕР се може користити за економску анализу система, рачунајући капитал, замену неисправних делова, рад и одржавање и потрошњу дизел горива. ХОМЕР се може користити за три кључна задатка: симулацију, оптимизацију и процес анализе осетљивости. Анализа осетљивости омогућава да се процени утицај неизвесности или промена у варијаблама над којима корисник нема контролу, као што су сунчево зрачење, оптерећење и цена горива [41].

Детаљна студија изводљивости, описана у [42] представља техно-економску процену самосталног хибридног система напајања са батеријским складиштењем енергије на малом удаљеном острву у Хонг Конгу. За симулације и техно-економску процену коришћен је софтвер ХОМЕР где су улазни подаци о сунчевом зрачењу, брзини ветра и температури измерени током 2009. године. Представљена је детаљна анализа, опис и очекиване перформансе предложеног система. Такође, испитани су утицај величине ФН панела,

величине ветротурбине и капацитета батерије на поузданост система и економске перформансе система.

Посматрани систем у раду [42] се састоји од ФН панела, ветроагрегата, батерије, DC/AC претварача (или DC/DC претварача) и контролера као што је приказано на слици 3.29. Излазни једносмерни напон се претвара у наизменичан преко DC/AC претварача, док се вишак енергије води на батерију (пуни се батерија). Уколико сви потрошачи користе наизменични напон напајања, повезани су на AC сабирницу. Дневно оптерећење на овом острву је процењено на 250 kWh/дан, а произвољно је додато оптерећење за поједине дане, да би се направило објективно стање за годину дана. На основу метеоролошких података и потрошње оптерећења, помоћу софтвера ХОМЕР анализиране су различите конфигурације како би се добила оптимална конфигурација система. Оптимална конфигурација система се састоји од низа ФН панела (145 kW), ветроагрегата (2 јединице, 10,4 kW), батерије (144 јединице, укупно 706 kWh) и претварача (6 јединица, 30 kW). ФН панел је максималне снаге 210W, (номинални излазни напон 26,4 Vdc и струје 7,95 A) ветроагрегат (*Proven 11*) 5,2 kW, који генерише једносмерни излазни напон од 48 Vdc до 300 Vdc [42].



Слика 3.29. Дијаграм тока енергије предложеног хибридног система [42]

Списак оперативних перформанси и појединих економских резултата ФН панела, ветротурбина и батерија, који су добијени софтверским прорачуном, представљени су у табели 3.10. Добијени резултати и детаљна студија спроведени су за процену изводљивости као и техно-економску процену хибридног система напајања који користи енергију сунца и ветра и складиштење енергије у батеријама називног капацитета 605 kWh. Фактори капацитета ФН панела и ветроагрегата били су релативно ниски. Фактори капацитета представљају однос максималне снаге коју може да генерише ФН панел/ветроагрегат и вредности снаге која се генерише у одређеном тренутку. Трошкови ФН панела и ветроагрегата износили су 22% и 34% цене енергије. Међутим, трошак за коришћење батерије је значајно висок и износи приближно 30% цене енергије. Цена батерије је већа од цене ФН панела, што би у неким случајевима могло да објасни зашто крајњи корисници избегавају уређаје за складиштење енергије и користе више различитих извора енергије [42].

Табела 3.10. Једногодишњи параметри система симулирани HOMER-ом [42]

Параметар	Вредност	Вредност	Параметар	Вредност
/	ФН панел	Ветар	Батерија	
Номинална снага	145 kW	10.4 kW	Број батерија	144
Излазна снага	20 kW	3.4 kW	Број батерија паралелно спојене	6
Фактор капацитета	14 %	32.5 %	Употребљиви називни капацитет	605 kWh
Укупна производња	177,882 kWh/god	29,584 kWh/god	Аутономија	58,1 h
Сати рада	4392 h/god	7688 h/god	Укупни проток енергије (за век трајања)	1,468,224 kWh
Нивелисани трошак	0,128 \$/kWh	0,2 \$/kWh	Улазна енергија	37,829 kWh/god
			Излазна енергија	32,561 kWh/god
			Трошак хабања батерије	0,174 \$/kWh
			Очекивани век трајања	20 god

У табели 3.11 приказани су резултати израчунате оптималне конфигурације за различите нивое оптерећења од 150 до 400 kWh/дан. Како се оптерећење повећава, капацитет ФН панела, снага ветроагрегата (број ветротурбина), број батерија и величина претварача се постепено повећава. Цена утрошене енергије за оптерећење од око 250 kWh/дан, при анализи у раду [42], за систем који користи енергију сунца, ветра и батерије износи 0,59–0,61 \$/kWh, а за систем који користи енергију сунца и батерије износи 0,73–0,75 \$/kWh. У поређењу са системом који користи само енергију сунца, хибридни систем који користи енергију сунца и ветра има мање губитке електричне енергије, потребан је мањи капацитет батерија и има ниже вредности цене енергије. Поред тога, економске користи система сунце-ветар-батерија постају значајније што је већа снага потрошача [42].

Табела 3.11. Оптимална конфигурација система за различита просечна дневна оптерећења [42]

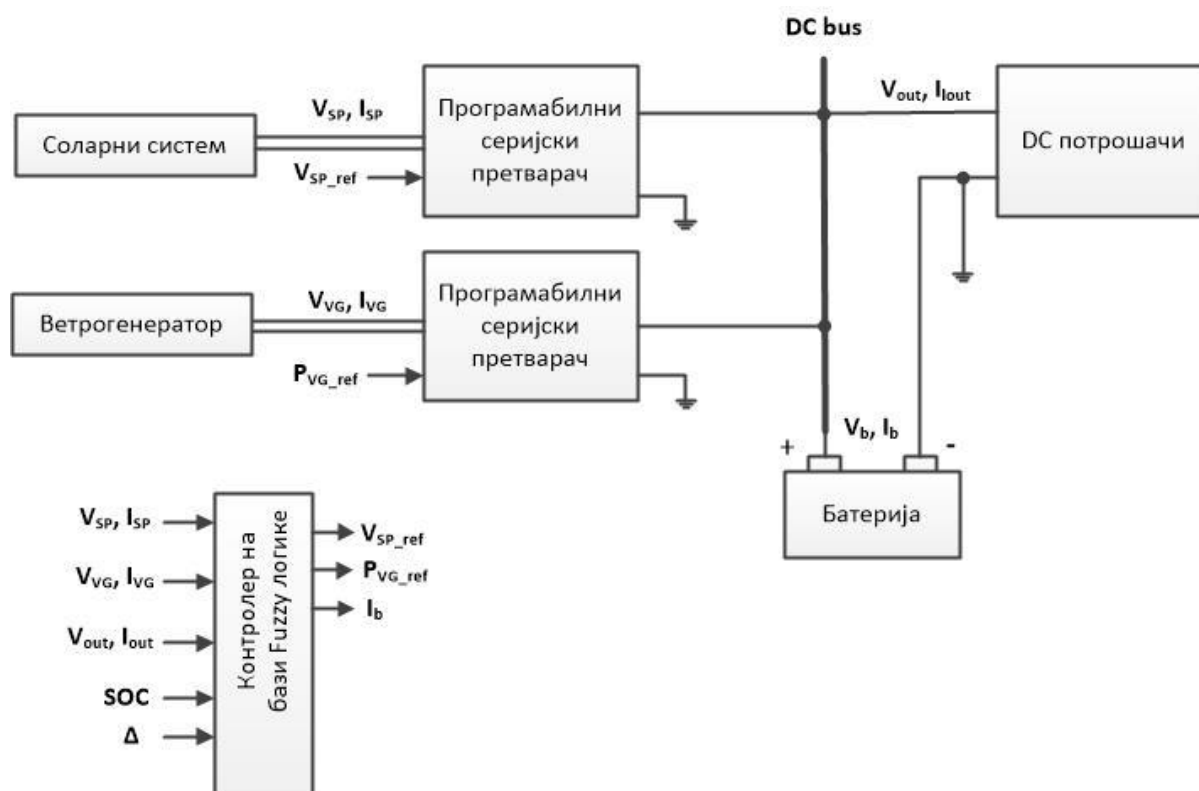
Дневна потрошња [kWh]	Систем	Снага ФН панела [kW]	Број ветротур. (снага 10,4 kW)	Број батеријског низа	Снага претварача [kW]	Цена енергије [\$/kWh]	Вишак енергије [%]
150	Сунце/ветар/батерија	130	1/	2	20	0,601	63,3
	Сунце/батерија	150	/	4	20	0,741	64,7
200	Сунце/ветар/батерија	110	2	5	25	061	48,3
	Сунце/батерија	205	/	5	25	0732	65,6
250	Сунце/ветар/батерија	145	2	6	30	0,595	48,6
	Сунце/батерија	240	/	7	30	0,734	63,2
300	Сунце/ветар/батерија	235	2	5	35	0,595	59,7
	Сунце/батерија	320	/	7	35	0,731	66,9
350	Сунце/ветар/батерија	210	3	8	40	0,595	50,6
	Сунце/батерија	355	/	9	40	0,732	65,2
400	Сунце/ветар/батерија	245	3	9	50	0,591	50,8
	Сунце/батерија	390	/	11	45	0,733	63,8

4. РЕАЛИЗАЦИЈА УПРАВЉАЧКОГ МОДУЛА

4.1. Опис управљачког модула

Реализовани систем напајања, чија је блок шема приказана на слици 4.1, се састоји од три различита извора енергије, од којих су два из обновљивих извора (сунце и ветар), док је трећи извор резервни у виду акумулаторске батерије. Сваки извор је повезан преко посебног претварача на заједничку сабирницу једносмерног напона (DC сабирницу), као на слици 4.1. Директно на сабирницу су повезани и потрошачи и батерија. Будући да обновљиви извори енергије треба искључиво да генеришу електричну енергију, могу се користити унидирекциони претварачи, код којих је ток снаге увек у смеру од извора ка заједничкој сабирници једносмерног напона. Са друге стране, батерија служи као резервни извор енергије код којег је ток снаге у оба смера. Батерија је повезана паралелно са потрошачима и треба да снабде потрошаче у случају да два обновљива извора не могу да произведу довољну енергију. Оног тренутка када обновљиви извори генеришу довољно енергије да снабдеју потрошаче, сав вишак треба да се искористи за пуњење акумулаторских батерија ако за то постоји потреба [43].

За управљање хибридним системом напајања користи се контролер на бази фази логике. Основни извор енергије је сунчева светлост која се преноси преко инсталираних ФН панела (ФН система). Уколико нема довољно енергије из основног извора, паралелно се додаје ветроагрегат који користи енергију ветра. Акумулаторска батерија се користи у ситуацијама када нема довољно енергије из обновљивих извора. С обзиром да је батерија паралелно повезана на DC сабирницу потрошач не осети прелаз са основног на резервни извор напајања [43].



Слика 4.1. Блок шема реализованог хибридног система напајања

Величине приказане на слици 4.1 су:

- V_{SP} – излазни напон ФН система,
- I_{SP} – излазна струја ФН система,
- V_{VG} – излазни напон ветроагрегата,
- I_{VG} – излазна струја ветроагрегата,
- V_{SP_ref} – референтни напон претварача на који је повезан ФН систем,
- P_{VG_ref} – референтна снага претварача на који је повезан ветроагрегат,
- V_b – напон на батерији,
- I_b – струја батерије,
- SOC – Напуњеност батерије у односу на њен капацитет (енгл. *State of charge*),
- V_{out} – излазни напон (напон потрошача),
- I_{out} – излазна струја (збир свих излазних струја),
- $\Delta(t)$ је разлика расположиве снаге у два сукцесивна тренутка мерења снаге.

Регулацијом напона на крајевима ФН система се управља снагом коју ФН систем може да генерише. Контролна петља треба да подеси напон тако да ФН систем даје довољно снаге да снабде потрошаче и да напуни акумулаторску батерију ако за то постоји потреба. Уколико снага која се добија са ФН система није довољна да би се испунио овакав захтев, ФН систем се задржава у тачки максималне снаге користећи МРРТ алгоритам, док преосталу снагу обезбеђује ветроагрегат. Генерисане референтне снаге су конзистентне како захтева оптерећење. У тренуцима када ФН систем генерише више снаге него што је потребно потрошачима, а батерије су напуњене, референтна вредност напона претварача се подешава тако да се из извора користи само онолико енергије колико је довољно.

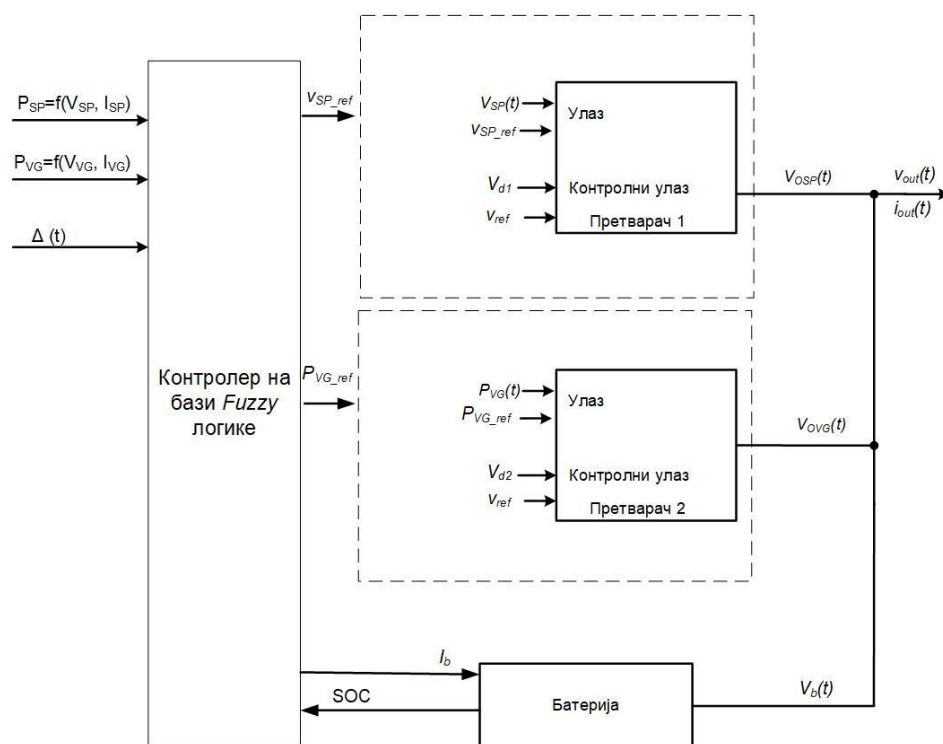
Као што је већ речено, ветроагрегат се укључује само у случају да ФН панел није у стању да генерише довољно електричне енергије. У том случају, ветроагрегат треба да генерише онолико снаге колико недостаје. Ако ни то није довољно, ветроагрегат наставља да ради тако да се испоручује максимална расположива снага, док се недостатак снаге за напајање потрошача надокнађује из батерије. За разлику од ФН система чијом снагом се управља регулацијом напона на његовим крајевима, снага ветротурбине се контролише управљањем брзине којом се она окреће [44-46].

Докле год је снага обновљивих извора довољна да снабде потрошаче и да омогући потребну енергију за пуњење акумулаторске батерије, батерија ради или у режиму пуњења, ако за то постоји потреба, или у режиму регулације напона на вредности одржавања, ако је процес пуњења завршен и ако је батерија напуњена [47]. У супротном, струја батерије добија негативан предзнак, што значи да батерија улази у режим пражњења, где сва три извора енергије снабдевају потрошаче.

На слици 4.2 је представљен блок дијаграм управљачког система примењеног за управљање хибридном системом напајања. Улазне величине у контролер су расположива снага која се добија из ФН система, расположива снага из ветроагрегата, стање напуњености батерије (SOC) и разлика вредности расположиве снаге у два сукцесивна тренутка мерења снаге. Након аквизиције измерених сигнала, фази алгоритам управљања хибридном системом напајања има за циљ да генерише потребне референце програмабилних серијских претварача (DC/DC претварачи) и струју батерије.

Управљачки систем се може поделити на две целине:

- 1) *Fuzzy Inference System* (FIS). FIS се користи као начин мапирања улазног простора у излазни простор помоћу фази логики. Задатак овог блока је да оптимално расподели укупну снагу извора коју је потребно остварити између извора по унапред одређеним правилима. FIS блок генереше задате вредности за сваки од претварача преко којих су извори повезани на једносмерну сабирницу.
- 2) Регулација карактеристичне величине сваког претварача. FIS блок прослеђује сваком претварачу референтну вредност регулисане величине. Сваки претварач има унутар себе управљачки подсистем, који треба да обезбеди стабилну и прецизну регулацију излазне величине са потребним пропусним опсегом регулације.



Слика 4.2. Блок дијаграм система примењеног за управљање хибридном системом напајања

Величине приказане на слици 4.2 су:

- V_{OSP} - излазни напон претварача на који је повезан ФН систем,
- V_{OVG} - излазни напон претварача на који је повезан ветроагрегат,
- V_{ref} – референтна вредност напона на батерији,
- V_{d1} , V_{d2} су излазни напони из модулатора (PWM).

Илази из претвараача, батерија и потрошач повезани су у исту тачку, тако да V_{OSP} , V_{OVG} , V_b и V_{out} имају исту вредност, али због једноставнијег разумевања су означени различитим симболима. V_{ref} је референтна вредност напона на батерији. С обзиром да је батерија повезана на исту линију са излазима претвараача, онда напон на батерији диктира вредност излазног напона. Уколико се батерија испразни испод $V_{b,min}=20,4 \text{ V}$, поднапонска склопка ће искључити батерију како не би дошло до оштећења.

Могуће ситуације у раду посматраног хибридног система напајања су:

- ФН систем има више енергије него што је потребно за напајање потрошача и пуњење акумулаторске батерије – рад на ФН систем уз ограничење да се користи само потребна енергија [43].

Овај режим рада хибридног система напајања може се представити формулом (4.1), где је P_{SP} снага ФН система, P_{load} је снага потребна потрошачима, а $P_b < 0$ је снага потребна за пуњење батерије.

$$P_{SP} > P_{load} + P_b \Rightarrow P_{load} = k_1 * P_{SP} + P_b, \quad (4.1)$$

- Два обновљива извора енергије производе више снаге него што је потребно за напајање потрошача и пуњење акумулаторских елемената – рад са два извора енергије уз ограничење да се укупно узима само потребна снага [43].

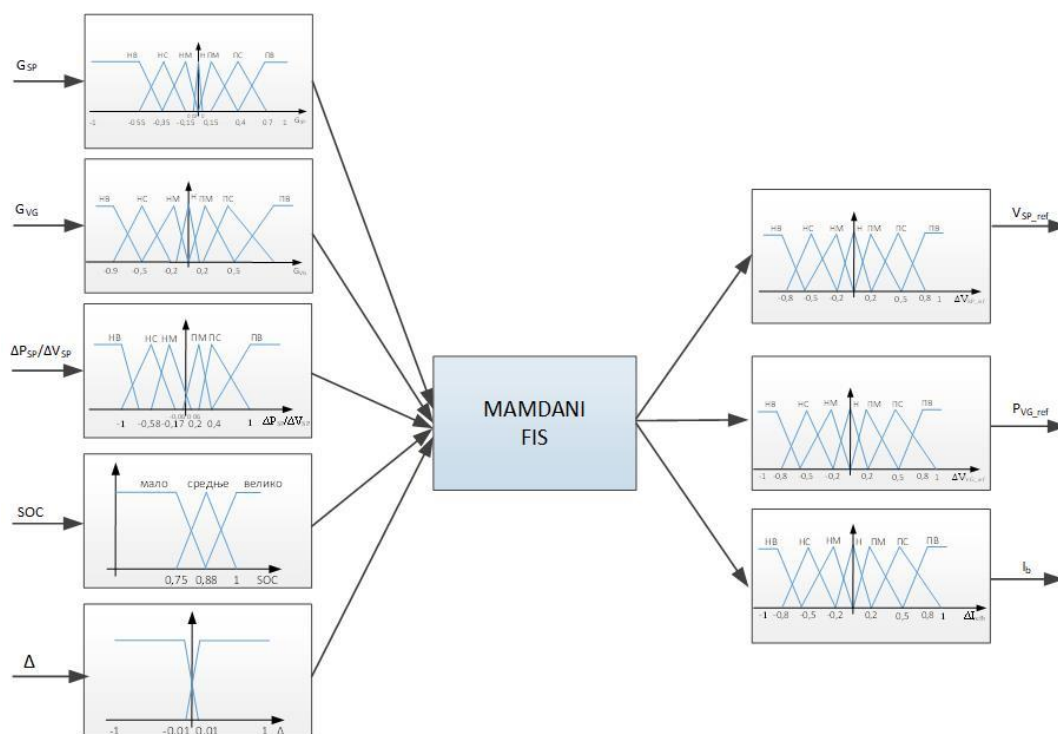
Овај режим рада хибридног система напајања може се представити формулом (4.2), где је P_{VG} снага ветроагрегата, P_b је снага потребна за пуњење батерије, а $P_b < 0$ је снага потребна за пуњење батерије.

$$P_{SP} + P_{VG} > P_{load} + P_b \Rightarrow P_{load} = k_1 * P_{SP} + k_2 * P_{VG} + P_b, \quad k_1, k_2 < 1 \quad (4.2)$$

- Обновљиви извори не производе довољну снагу за напајање потрошача [43]. Снага која недостаје се узима из акумулационог елемента - заједнички рад обновљивих извора и акумулационог елемента. (4.3), а $P_b > 0$ је снага која се узима из батерије.

$$P_{SP} + P_{VG} < P_{load} \Rightarrow P_{load} = P_{SP} + P_{VG} + P_b. \quad (4.3)$$

FIS формализује процес закључивања помоћу фази логике. Контролер заснован на бази фази логике са дефинисним скупом правила, обезбеђује несметан прелаз између различитих режима рада система. Најчешће се користе директне методе, попут Мамданијеве [48,49] и Сугенове [50]. Мамданијева метода се често користи у практичним апликацијама, због своје једноставне структуре типа „min-max“ операција, и због тога је изабрана и у овој апликацији. Коначно, такав систем управљања даје глатке прелазе у дистрибуцији снаге са једног извора на други. Помоћу фази контролера могу се адекватно дефинисати стања обновљивих извора и напуњеност батерије. На основу тога, кроз скуп правила, дефинисано је управљање серијским претварачима и пуњачем батерије. Општи приказ фази логике приказан је дијаграмом на слици 4.3. Излази су управљачки сигнали, референтни улазни напон за серијски претварач на који је повезан ФН систем, референтна вредност снаге за претварач на који је повезан ветроагрегат и струја батерије. Функције припадности су троугаоног и трапезног облика, а нормализација функција је на основу номиналних вредности функција улаза.



Слика 4.3. Блок дијаграм фази система

Улазне функције припадности се разликују у односу на три описане ситуације у раду посматраног хибридног система. Уколико напајање потрошача обезбеђује ФН систем фази контролер има 4 улазне величине. За управљање ветроагрегатом користе се 3 улазне величине у фази контролер од којих је једна од величина позитивна или негативна вредност разлике снаге коју генерише ФН панел и снаге која је потребна за напајање потрошача. Вредност напуњености батерије, фигурише као улазни параметар за сваку могућу ситуацију у раду. Ради лакшег описивања рада система, FIS и управљачка електроника претварача је појединачно описана за сваку ситуацију у раду.

4.1.1. Управљање претварачем на који је повезан ФН систем

ФН систем може да ради у два режима, MPPT где испоручује своју максималну снагу, или нормални режим где се испоручује само снага која је потребна за напајање потрошача. Први режим је неопходан да би извори напајања имали високу ефикасност коришћења, док се у нормалном режиму производи довољно енергије за напајање потрошача и није неопходно користити максималну снагу извора. Батерија се допуњује само ако је SOC ниско или средње.

Ако ФН систем производи више снаге него што је потребно оптерећењу ($P_{SP} > P_{load}$) вишак снаге се усмерава на пуњење батерија. Режим рада ФН система зависи и од стања напуњености батерије SOC. Уколико је SOC средње или ниско, вишак снаге се користи за пуњење батерије, међутим уколико је SOC високо ФН систем се поставља у нормални режим рада и нема потребе за допуњавањем батерије.

Део логики фази контролера који се користи за управљање ФН системом има четири улаза (G_{SP} , $\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}$, SOC, Δ) и један излаз (ΔV_{SP_ref}):

- 1) Разлика снаге коју генерише ФН систем (G_{SP}) и снаге која је потребна за напајање потрошача може се представити као:

$$G_{SP} = P_{SP} - P_L, \text{ где су } P_{SP} = I_{SP} * V_{SP}, P_L = I_{load} * V_{DC},$$

где су V_{DC} и V_{SP} напон DC сабирнице и напон ФН система, I_{load} и I_{SP} су струја потрошача и струја ФН система.

- 2) Знак промене вредности напона на излазу ФН система, Δ , може бити позитиван уколико је $V_{oSP}(nT) > V_{oSP}((n-1)T)$ или негативан за $V_{oSP}(nT) < V_{oSP}((n-1)T)$.

- 3) Однос између разлике снаге и разлике напона на улазу и излазу из ФН система ($\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}$) користи се за подешавање радне тачке, где су:

$$\Delta P_{SP} = P_{SP}(nT) - P_{SP}((n-1)*T),$$

$$\Delta V_{SP} = V_{SP}(nT) - V_{SP}((n-1)*T),$$

$$\Delta V_{SP_ref} = V_{SP_ref}(nT) - V_{SP_ref}((n-1)*T),$$

- 4) Стање напуњености батерије (SOC).

Напуњеност батерије може се поделити на три нивоа: низак SOC је ниво где батерија достиже дубоко пражњење; високи SOC је ниво где је батерија у стању потпуне напуњености и средњи ниво. Према правилу напуњености батерије, FIS бира режим рада ФН система као што је дато у табели 4.1. На основу изабраног режима рада и стања остала три улаза, FIS генерише излаз који представља промену референтног напона програмабилног серијског претварача на који је повезан ФН систем као што је приказано на слици 4.4.

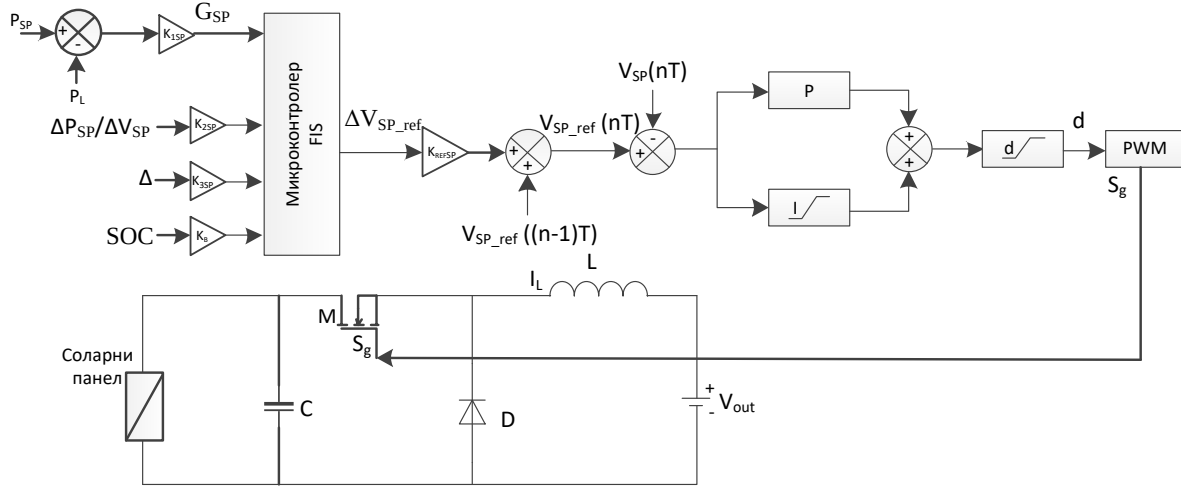
Табела 4.1. Режим рада ФН система у односу на напуњеност батерије

SOC - ниско	SOC – средње	SOC - високо
MPPT режим	MPPT режим	Нормални режим

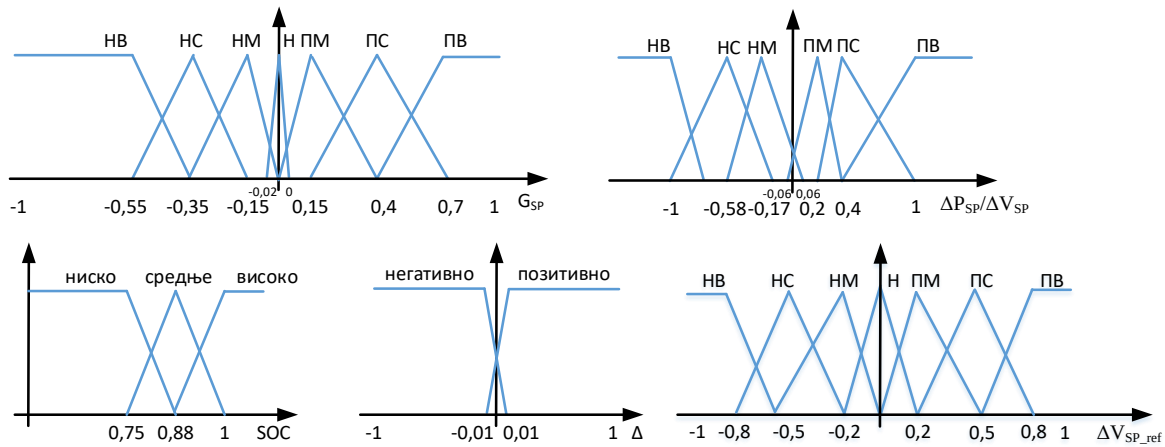
Надређени контролер је заснован на фази правилима управљања која су приказана у табели 4.2. Када је вредност излазног напона лево од вредности MPP тада V_{SP_ref} се мора повећати да би се достигла тачка максималне снаге, у супротном, V_{SP_ref} се смањује. Вреди и обрнуто. Знак промене излазног напона је Δ и има два стања, позитивно (+) и негативно (-). $\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}$ може бити и позитивно и негативно за оба знака промене напона V_{SP} . Улаз G_{SP} и излаз (ΔV_{SP_ref}) имају седам различитих стања: НВ (негативни велики), НС (негативни средњи), НМ (негативни мали), Н (нула), ПМ (позитивни мали), ПС (позитивни средњи) и ПВ (позитивни велики). Улаз $\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}$ има 6 стања. Ситуација да је $\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}=0$ се не узима у разматрање јер је вредност нула практично немогућа. Вредности улазних функција припадности у фази систем приказане су на слици 4.5. Улазне функције припадности су нормализоване на опсег вредности (-1,1), уз одговарајући коефицијент нормализације, K_{1SP} , K_{2SP} и K_B . Коефицијенти нормализације пресликавају вредности из апсолутних јединица у релативне. Након дефинисања излаза из фази контролера, коефицијентом денормализације

K_{refSP} се израчунава апсолутна вредност излаза ΔV_{SP_ref} . Израчуната вредност излаза ΔV_{SP_ref} се сабира са вредности V_{SP_ref} у претходном тренутку одабирања. Периода одабирања износи $20 \mu s$, што износи три пута мању периоду од прекидачке периоде претварача.

За вредности $G_{SP} < 0$ добија се да је $P_{SP} < P_L$, односно да је снага ФН система недовољна за напајање потрошача. Уколико је $G_{SP} > 0$ значи да је $P_{SP} > P_L$ и ФН систем има довољно енергије за напајање потрошача. За SOC ниско или средње, V_{SP_ref} ће се одржавати на вредности на којој се добија снага довољна за напајање потрошача и допуњавање батерије. V_{SP_ref} ће се подесити тако да је $P_{SP} = P_L + P_b$. Уколико је SOC високо, није потребно допуњавање батерије и V_{SP_ref} треба подесити тако да је $P_{SP} = P_L$, односно тежити да G_{SP} буде једнако нули.



Слика 4.4. Блок шема управљачког система спуштача напона за прикључење ФН панела



Слика 4.5. Вредности улазних (G_{SP} , $\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}$, SOC, Δ) и излазних (ΔV_{SP_ref}) функција припадности

Табела 4.2. Правила фази логике ФН система за излазну величину ΔV_{SP-ref}

/		SOC – ниско или SOC - средње							SOC - високо						
Режима рада		MPPT							MPPT				Нормални		
Δ	G_{SP} $\Delta P_{SP}/\Delta V_{SP}$	НВ	НС	НМ	Н	ПМ	ПС	ПВ	НВ	НС	НМ	Н	ПМ	ПС	ПВ
+	НВ	НС	НС	НС	НМ	НМ	Н	ПМ	НС	НС	НС	Н	ПМ	ПМ	ПС
-	НВ	ПС	ПС	ПС	ПМ	ПМ	Н	НМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	НМ	НС
+	НС	НМ	НМ	НМ	НМ	НМ	Н	ПМ	НМ	НМ	НМ	Н	ПМ	ПМ	ПМ
-	НС	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	НМ	НМ
+	НМ	НМ	НМ	НМ	НМ	НМ	Н	ПМ	НМ	НМ	НМ	Н	ПМ	ПМ	ПМ
-	НМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	НМ	НМ
+	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	НМ	НМ
-	ПМ	НМ	НМ	НМ	НМ	НМ	Н	ПМ	НМ	НМ	НМ	Н	НМ	НМ	НМ
+	ПС	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	ПМ	ПМ	ПМ	Н	НМ	НМ	НМ
-	ПС	НМ	НМ	НМ	НМ	НМ	Н	ПМ	НМ	НМ	НМ	Н	НМ	НМ	НМ
+	ПВ	ПС	ПС	ПС	НМ	ПМ	Н	НМ	ПС	ПС	ПС	Н	НМ	НМ	НС
-	ПВ	НС	НС	НС	НМ	НМ	Н	ПМ	НМ	НМ	НМ	Н	НМ	НМ	НС

Мерени сигнали ФН система се прослеђују FIS блоку, који након обраде, израчунава промену референтне вредности напона (ΔV_{SP-ref}) на крајевима ФН система, тако да ФН систем генерише потребну снагу. Та промена се сабира се референтном вредношћу из претходне периоде одабирања ($V_{SP-ref} (n-1)T$) одакле се добија тренутна референтна вредност напона на крајевима ФН панела ($V_{SP-ref} (nT)$). Управљачки блок самог претварача има задатак да постигне референту вредност напона на крајевима ФН система, која је задата од стране надређеног FIS управљачког блока. Да би се постигла нулта грешка праћења референце у устаљеном стању, користи се ПИ регулатор [51]. Потребно је ограничити и интегрално дејство и укупно дејство ПИ регулатора на максималну и минималну вредност управљачке променљиве, што је у конкретном случају фактор испуне (*duty-cycle* – $d(s)$) који се креће у опсегу од 0 до 1. На основу вредности фактора испуне D , PWM модулатор одређује проценат периоде прекидања када је прекидач S_g укључен. На тај начин је затворена петља по улазном напону.

Најпре је потребно урадити прорачун елемената претварача на основу улазно излазних карактеристика и осталих захтева, који су приказани у табели 4.3. Вредност пригушнице (L) је изабрана тако да таласност излазне струје буде једнака 1 % од једносмерне компоненте струје кроз пригушницу при максималном оптерећењу (једначина 4.6). Да би било могуће применити MPPT алгоритам и при мањим вредностима нивоа осветљености ФН панела (од 200 W/m^2 па навише), потребно је везати три ФН панела на ред. Према спецификацијама коришћеног панела (ECO LINE M 72/215 W) при осветљености од око 200 W/m^2 један ФН

панел генерише напон од приближно 10 V. У реализованом решењу, три ФН панела би у том случају дали на свом излазу 30 V, што је свакако веће од максималног напона батерије који износи 28.8 V.

Табела 4.3. Елементи за прорачун спуштача напона

$V_{SPmin}=33 \text{ V}$	$V_d=0,7 \text{ V}$	Таласност излазне струје (енгл. <i>ripple</i>) $\Delta_r < 1\%$ $f_s=150*10^3 \text{ Hz}$
$V_{SPmax}=108 \text{ V}$	$V_{ds}=0,2 \text{ V}$	
$V_{outmin}=24 \text{ V}$	$R_L=0,01 \Omega$	
$V_{outmax}=28.8 \text{ V}$	$I_L=20 \text{ A}$	

Где су:

- V_{SPmin} и V_{SPmax} минимална и максимална вредност напона ФН система.
- V_{outmin} и V_{outmax} минимална и максимална вредност излазног напона (ка батерији и потрошачима),
- V_d напон диоде, V_{ds} напон између дрејна и сорса MOSFET-а, R_L процењена отпорност индуктивности, I_L струја потрошача. Таласност (Δ_r) је одступање струје у односу на средњу вредност струје потрошача.

$$D_{min} = \frac{V_{outmin} + V_d + I_L * R_L}{V_{SPmax} - V_{ds} + V_d} = 0,229 \quad (4.4)$$

$$D_{max} = \frac{V_{outmax} + V_d + I_L * R_L}{V_{SPmin} - V_{ds} + V_d} = 0,8866 \quad (4.5)$$

$$L = \frac{V_{SPmax} - V_{ds} - I_L * R_L - V_{outmin}}{\Delta_r * I_L} * \frac{D_{min}}{f_s} = 0,6mH \quad (4.6)$$

$$\Delta I_L = \Delta_r * I_L = 0,2 \quad (4.7)$$

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{dI_L}{2} = 20,1A \quad I_{Lmin} = I_L - \frac{dI_{Lout}}{2} = 19,9A, \quad (4.8)$$

где су D_{min} и D_{max} минимална и максимална вредност фактора попуне, ΔI_L промена вредности струје кроз пригушницу, I_{Lmax} и I_{Lmin} максимална и минимална вредност струје кроз пригушницу.

Укупни губици се рачунају према једначини 4.13, а користећи изразе за вредности губитака MOSFET-а, диоде и пригушнице (једначине 4.9 до 4.12), где су:

$P_{fetcond}$ - кондуктивни губици MOSFET-а, а t_{rise} , t_{fall} време трајања узлазне и силазне ивице.

Кондуктивни губици MOSFET-а рачунају се према 4.9, а прекидачки губици према 4.10.

$$P_{fetcond} = I_L * V_{ds} * D_{max} = 3,5464 \text{ W.} \quad (4.9)$$

$$P_{fetSP} = 0,5 * V_{SPmax} * I_L * (t_{rise} + t_{fall}) * f_s = 6,48 \text{ W}, \quad (4.10)$$

Где су $t_{rise} = 20 * 10^{-9} \text{ s}$, $t_{fall} = 20 * 10^{-9} \text{ s}$.

Вредност губитака на диоди рачуна се према 4.11, а на пригушници према 4.12.

$$P_d = I_L * V_{ds} * (1 - D_{min}) = 10,794 \text{ W} \quad (4.11)$$

$$P_{ind} = I_L^2 * R_L = 4 \text{ W} \quad (4.12)$$

$$P_{tot} = P_{fetcond} + P_{fetSP} + P_d + P_{ind} = 24,8204 \text{ W} \quad (4.13)$$

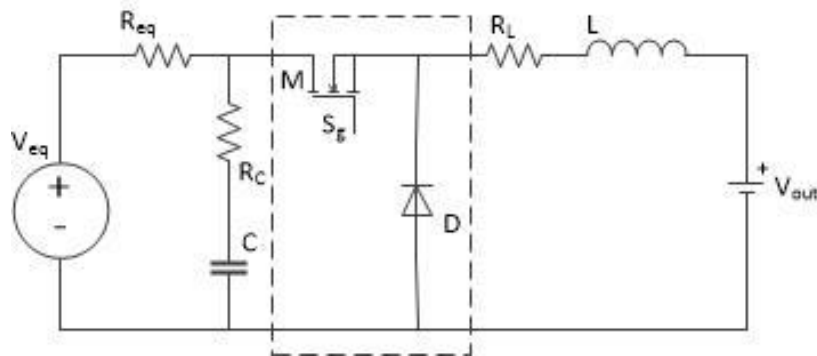
На основу добијених вредности израчунава се степен искоришћења, према једначини 4.14.

$$\eta_1 = \frac{P_{outmax}}{P_{outmax} + P_{tot}} = 0,9587, \quad (4.14)$$

где је P_{outmax} максимална излазна снага која се израчунава према формули 4.15.

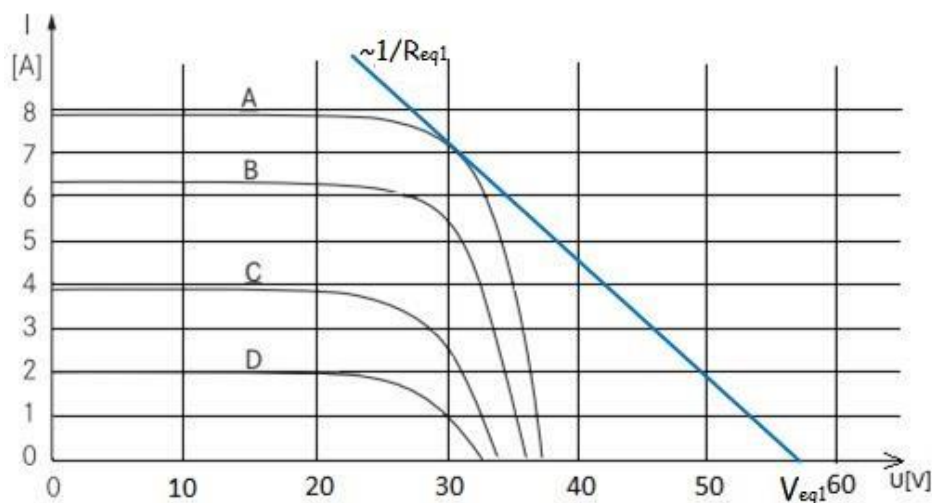
$$P_{outmax} = V_{outmax} * I_L \quad (4.15)$$

На слици 4.6 приказана је заменска шема спуштача напона са линеарним моделом ФН панела. Испрекиданом линијом су уоквирене полупроводничке компоненте које раде у прекидачком режиму и чине систем нелинеарним.



Слика 4.6. Спуштач напона са линеарним моделом ФН система

Да би се подесили параметри потребно је линеаризовати модел и анализирати у околини одређене радне тачке, под претпоставком малих одступања процесних величина од њихових вредности у радној тачки (енгл. *small signal analysis*), а потом извести функцију преноса. Линеарни модел ФН панела се може представити као серијска веза еквивалентног напонског извора V_{eq1} и еквивалентне серијске отпорности R_{eq1} [52]. Линеаризација је извршена у MPPT радној тачки при максималној осветљености ФН панела од 1000 W/m^2 , на начин приказан на слици 4.7. Добијене вредности су уписане у табелу 4.4 где је D константна вредност фактора испуне у радној тачки у којој се ради линеаризација рада претварача. Будући да ФН систем чине три редно везана ФН панела, еквивалентна отпорност R_{eq} и вредност напонског извора V_{eq} су 3 пута веће. На основу вредности напона V_{SP}^{MPPT} и струје I_{SP}^{MPPT} ФН система у MPPT радној тачки (слика 4.7) и вредности излазног напона батерије V_{out} , могу се израчунати вредности фактора испуне и струје кроз пригушницу.



Слика 4.7. Линеаризација ФН панела у околини MPPT тачке
(A=1000 W/m^2 , B=800 W/m^2 , C=600 W/m^2 , D=400 W/m^2)

Табела 4.4. Линеаризација модела претвараача у МРРТ радној тачки

Радна тачка претвараача у којој је извршена линеаризација	Параметри реактивних компоненти претвараача	Линеарни модел ФН панела
$V_{out}=27,3 \text{ V}$ $V_{SP}^{MPPT}=32 \text{ V}$ $I_{SP}^{MPPT}=7 \text{ A}$ $D = \frac{V_{out}}{3V_{SP}^{MPPT}} = 0.285$ $I_L = \frac{I_{SP}^{MPPT}}{D} = 24.5 \text{ A}$	$R_L=10 \text{ m}\Omega$ $L=0,6 \text{ mH}$ $R_C=70 \text{ m}\Omega$ $C=1000 \text{ }\mu\text{F}$ $T_c=C R_c=70 \text{ }\mu\text{s}$	$V_{eq1}=56 \text{ V}$ $R_{eq1}=3,2 \text{ }\Omega$ $V_{eq}=3V_{eq1}=168 \text{ }\Omega$ $R_{eq}=3R_{eq1}=9,6 \text{ }\Omega$

Након што су познати сви параметри (табела 4.4) и одређена радна тачка у којој је извршена линеаризација, може се извести функција преноса (4.16) зависности улазног напона $v_{SP}(s)$ од фактор испуне (*duty-cycle* – $d(s)$), користећи методу *small signal analysis* на начин описан у [53].

$$G_{vd}(s) = \frac{v_{SP}(s)}{d(s)} = \frac{(1 + sT_C) \left(I_L + \frac{(V_{out} * D(1 - sT_C))}{(R_L + sL)} \right)}{sC + (1 + sT_C) \left(\frac{1}{R_{eq}} + \left(\frac{D^2}{(R_L + sL)} \right) \right)}, \quad (4.16)$$

Када је позната функција преноса претвараача $G_{vd}(s)$ и сви параметри који фигуришу унутар израза, потребно је подесити параметре ПИ регулатора тако да се постигне жељени пропусни опсег (w_{cf}) и претек фазе (фазну маргину РМ) регулације улазног напона. За подешавање параметара регулатора коришћен је МАТЛАБ софтвер и анализа система помоћу Бодеових дијаграма. Функција преноса ПИ регулатора $C(s)$ дата је једначином (4.17).

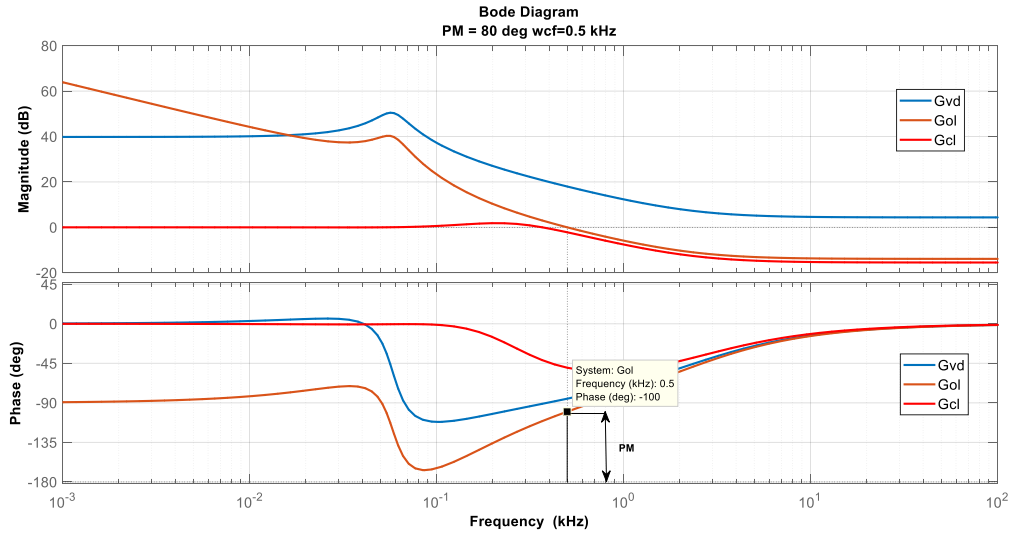
Према једначини (4.18) функција преноса у отвореној петљи једнака је производу функције оптерећења $G_{vd}(s)$ дате једначином (4.16) и једначине ПИ регулатора (4.17). Мерењем параметара ПИ регулатора, мења се и функција у отвореној петљи. На основу жељеног пропусног опсега w_{cf} и претека фазе РМ потребно је подесити параметре ПИ регулатора. Подешавање параметара регулатора може да се уради аналитички или помоћу доступних софтверских алата.

Параметре ПИ регулатора треба подесити тако да функција преноса (4.18) у отвореној петљи остварује 0 dB појачања на пресечној фреквенцији ω_{cf} ($G_{ol}(j\omega_{cf}) = 0dB$) (енгл. *crossover frequency*). Може се сматрати да је фреквенција ω_{cf} приближно једнака фреквенцији пропусног опсега регулације када систем ради у затвореној петљи. Фазни став функције преноса Φ у отвореној петљи при фреквенцији ω_{cf} ће одредити претек фазе ($PM = 180^\circ - \Phi(\omega_{cf})$). Да би систем био стабилан потребно је да $PM > 0$. Параметри ПИ регулатора k_p и k_i су одређени тако да се постигне пропусни опсег од $\omega_{cf} = 500 Hz$ и $PM = 80^\circ$, као што је приказано на слици 4.8. Може се приметити, са слике 4.8 да функција преноса у затвореној петљи $G_{cl}(s)$ остварује на фреквенцији ω_{cf} , амплитудско слабљење је приближно 3 dB, док је фазно кашњење приближно 45° , што значи да је систем на фреквенцији ω_{cf} на граници пропусног опсега.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (4.17)$$

$$G_{ol}(s) = G_{vd}(s) * C(s), \quad (4.18)$$

$$G_{cl}(s) = \frac{G_{ol}(s)}{1 + G_{ol}(s)}, \quad (4.19)$$



Слика 4.8. Подешавање параметара ПИ регулатора у функцију спрегнутог преноса помоћу Бодеевог дијаграма

Добијене вредности параметара ПИ регулатора су: $k_p = 0.122$, $k_i = 101$.

4.1.2. Управљање претварачем на који је повезан ветроагрегат

Ветроагрегат је други обновљиви извор енергије и користи се у случају да ФН систем не може да обезбеди довољно енергије за напајање потрошача, односно када је

$G_{SP} = P_{SP} - P_L < 0$. Ветроагрегат се користи да надокнади енергију која је потребна за напајање потрошача. Један улазни параметар је разлика снаге коју обезбеђује ФН систем и снаге потребне за напајање потрошача. На основу улазних параметара, FIS генерише излаз који представља снагу коју треба да обезбеди ветроагрегат. Остали улазни параметри у фази контролер су $G_{VG} = P_{SP} + P_{VG} - P_L$ и стање напуњености батерије SOC.

Део логики фази контролера који се користи за управљање ветроагрегатом има три улаза (G_{VG} , G_{SP} , SOC) и један излаз (ΔP_{VG_ref}):

- 1) Разлика снаге коју генерише ФН панел и снаге потребне потрошачима:

$$G_{SP} = P_{SP} - P_L$$

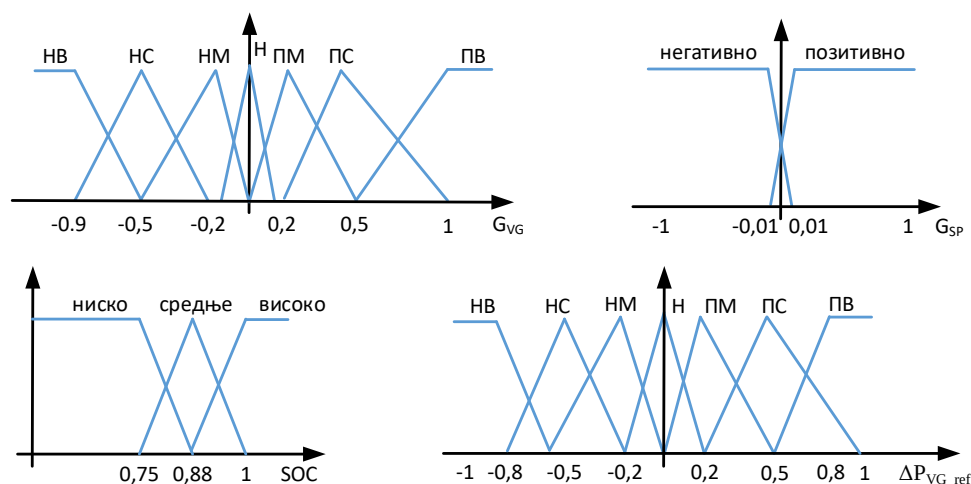
- 2) Разлика снаге коју генеришу ФН систем и ветроагрегат и снаге која је потребна за напајање потрошача (G_{VG}), може се представити као:

$$G_{VG} = P_{SP} + P_{VG} - P_L, \text{ где су } P_{VG} = I_{VG} \cdot V_{VG}, P_L = I_{load} \cdot V_{DC},$$

где су V_{DC} напон DC сабирнице, V_{VG} напон ФН система, I_{load} струја потрошача и I_{VG} струја ветроагрегата.

3) Стање напуњености батерије (SOC).

Као и код подешавања рада ФН система, улаз G_{VG} и излаз (ΔP_{VG_ref}) имају седам различитих стања: НВ (негативни велики), НС (негативни средњи), НМ (негативни мали), Н (нула), ПМ (позитивни мали), ПС (позитивни средњи) и ПВ (позитивни велики). Улаз SOC може имати три стања (високо, средње и ниско). На слици 4.9 представљене су вредности улазних и излазних функција припадности, а правила фази управљања приказана су у табели 4.5.



Слика 4.9. Вредности улазних (G_{VG} , G_{SP} , SOC) и излазних (ΔP_{VG_ref}) функција припадности

Табела 4.5. Правила фази логике ветроагрегата за излазну величину ΔP_{VG_ref}

Режим рада	SOC – ниско или SOC - средње							SOC - високо						
G_{VG}	НВ	НС	НМ	Н	ПМ	ПС	ПВ	НВ	НС	НМ	Н	ПМ	ПС	ПВ
G_{SP}	НВ	НС	НМ	Н	ПМ	ПС	ПВ	НВ	НС	НМ	Н	ПМ	ПС	ПВ
-	ПС	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПС	ПМ	ПМ	Н	НМ	НМ	НС

4.1.3. Правила коришћења батерије

Уколико ФН систем и ветроагрегат немају довољно енергије за напајање потрошача, а батерија је напуњена (SOC је средње или високо), недостајућа снага се користи из акумулаторске батерије. При коришћењу батерије, мора се водити рачуна о поднапонској заштити, односно вредности минималног напона батерије. На основу тога, у табели 4.6 представљено је правило када се батерија користи.

Табела 4.6. Правила коришћења батерије

SOC - ниско	SOC - средње	SOC - високо
не користити	користити	користити

Поштујући табелу 4.6, постављена су правила фази управљања приказана у табели 4.7. Услов који се узима у обзир је збир снага коју обезбеђују ФН систем и ветроагрегат и снаге потребне за напајање потрошача. На основу добијене вредности, FIS генерише излаз којим се одређује вредност струје батерије. Струја батерије може да има два смера, за пуњење батерије (позитиван смер) или за напајање потрошача (негативан смер).

Део логике фази контролера који се користи за управљање батеријама има два улаза (G_{VG} и SOC) и један излаз ΔG_{bref} :

- 1) G_{VG} је разлика снаге коју генеришу ФН систем и ветроагрегат и снаге која је потребна за напајање потрошача.
- 2) SOC је стање напуњености батерије.

Оба улаза G_{VG} и SOC и излаз ΔG_{bref} имају три вредности. G_{VG} може бити позитиван, нула и негативан, SOC на ниском, средњем и високом нивоу и излаз позитиван, нула и негативан. Излаз се може представити као $\Delta I_{bref} = I_{bref} (nT) - I_{bref} ((n-1) T)$ и представља промену струје батерије у једном периоду одмеравања. Уколико је излаз негативан, струја батерије је у смеру према потрошачима, уколико је излаз позитиван, батерија се пуни.

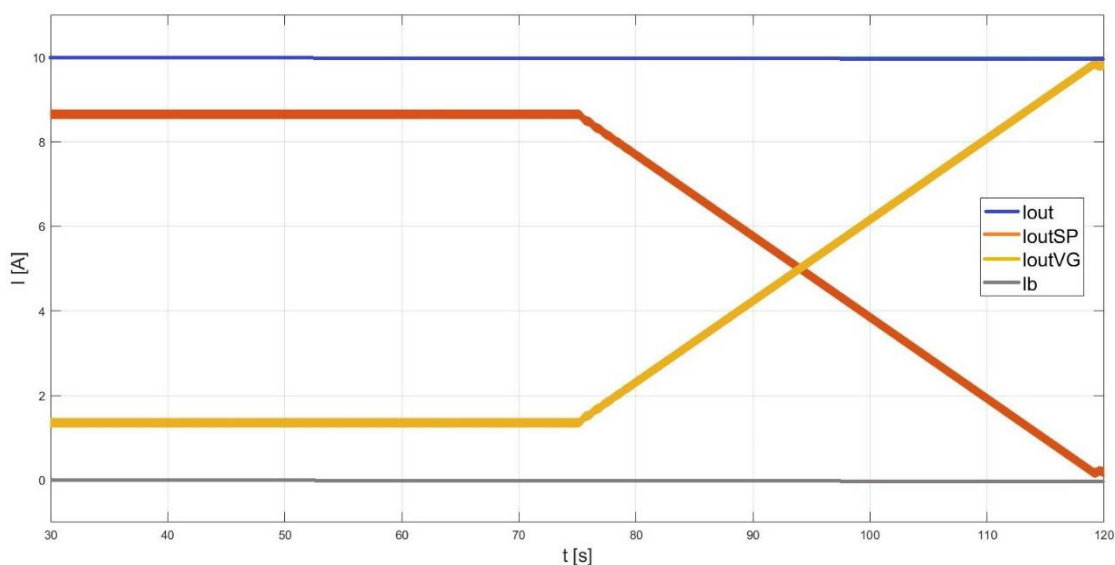
Табела 4.7. Правила фази логике коришћења батерије за излазну величину ΔI_{bref}

/	SOC		
G_{VG}	ниско	средње	високо
НВ	НМ	НМ	НС
НС	НМ	НМ	НС
НМ	НМ	НМ	НМ
Н	Н	Н	Н
ПМ	ПМ	ПМ	Н
ПС	ПС	ПМ	Н
ПВ	ПВ	ПС	Н

4.2. Резултати симулације

Да би се проверила ефикасност предложеног система за повезивање различитих извора напајања потрошача када није доступна електродистрибутивна мрежа, систем је симулиран применом софтвера МАТЛАБ/Симулинк.

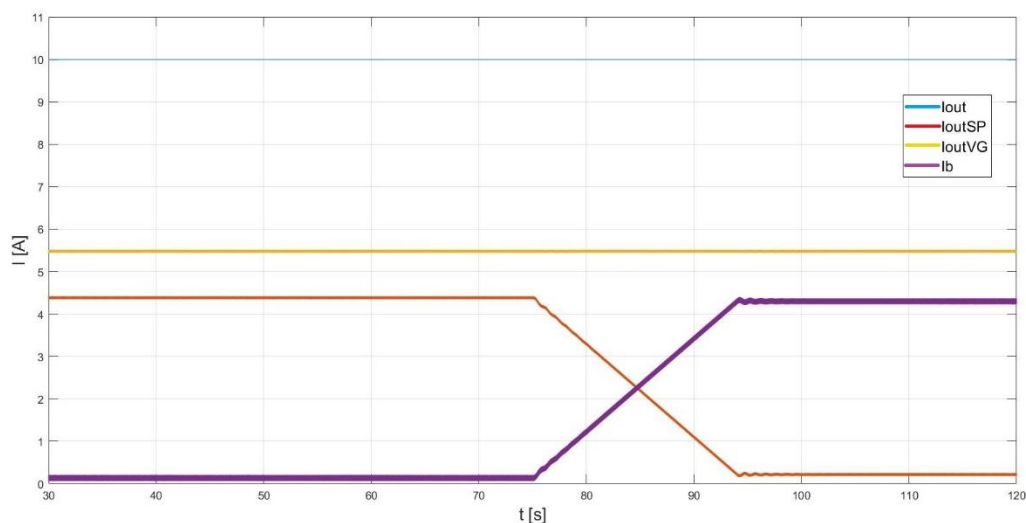
Симулација приказана на слици 4.10 приказује резултате напајања када је SOC високо, ФН систем нема довољно енергије за напајање потрошача ($P_{SP} < P_{out}$) те се укључује ветроагрегат. Збир снага којим располажу ФН систем и ветроагрегат је већа од снаге која је потребна за напајање потрошача ($P_{SP} + P_{VG} > P_{out}$). До $t=75$ s озраченост ФН система износи приближно 550 W/m^2 . ФН систем ради у MPPT радној тачки, али снага којом располаже није довољна за снабдевање потрошача па се недостајућа снага надокнађује из ветроагрегата. Од $t=75$ s до $t=120$ s приказан је прелазни процес када озраченост ФН система опада са око 550 W/m^2 на вредност приближно једнаку нули. Ветроагрегат располаже са довољно снаге да преузме снабдевање потрошача без потребе да се користи батерија.



Слика 4.10. Дијаграми улазних и излазних струја серијских претварача

Струја потрошача износи 10A, стим да је ФН панел напајао потрошаче струјом од око 8,3 A, а ветроагрегат око 1,7 A. У једном тренутку ФН систем остаје без озрачености и струја којом напаја потрошаче опада према нули. У том прелазном периоду ветроагрегат повећава струју којом се напајају потрошачи док не достигне вредност од око 10 A, у моменту када ФН систем не даје снагу оптерећењу. Батерија се у овом случају неће укључивати и давати снагу јер соларни систем и ветроагрегат у збиру имају довољно снаге за напајање потрошача.

Симулација приказана на слици 4.11 приказује резултате напајања када је SOC средње, енергија која се добија из ФН система и ветроагрегата приближно једнака енергији потребној потрошачима $P_{SP} + P_{VG} \approx P_{out}$. Струја из батерије је приближно једнака нули. До $t=75$ s озраченост ФН система износи приближно 400 W/m^2 . ФН систем и ветроагрегат раде у радној тачки максималне снаге. Недостатак снаге се узима из батерије што се може уочити на графику на слици 4.11. Од $t=75$ s до $t=120$ s приказан је прелазни процес када озраченост ФН система опада са око 400 W/m^2 на вредност приближно једнаку нули. Од тог момента, енергија потребна потрошачима се надокнађује из акумулаторске батерије што је омогућено с обзиром да је вредност SOC средње.



Слика 4.11. Дијаграм излазне струје према најгорем сценарију хибридног извора напајања

Струја потрошача износи 10А, стим да је ФН панел напајао потрошаче струјом од око 4,4 А, ветроагрегат око 5,4 А, а из батерија се користи струја од 0,2 А. У једном тренутку ФН систем остаје без озрачености и струја којом напаја потрошаче опада према нули. У том прелазном периоду повећава се струја из батерије што се може уочити на графику на слици 4.11. Симулација приказана на графицима 4.10 и 4.11 представља идеално праћење задате референтне вредности што је последица споре промене улазних вредности.

Симулације су показале да се хибридни систем напајања понаша према постављеним правилима фази логике. Уколико обновљиви извори имају довољно енергије за напајање потрошача, батерија се неће укључивати као што је дефинисано фази правилима. Уколико обновљиви извори немају довољно енергије за напајање потрошача, а батерија је довољно напуњена, недостатак снаге ће се генерисати из батерије. При преласку са једног на други извор напајања потрошачима се обезбеђује стабилан излазни напон.

5. КВАЛИТЕТ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ХИБРИДНИМ СИСТЕМИМА ЗА НАПАЈАЊЕ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОНИХ УРЕЂАЈА

5.1. Квалитет електричне енергије

Системи напајања се налазе између примарних извора енергије и корисника – потрошача. Поред тога што треба да обезбеде поуздан рад потрошача, системима напајања додељена је и заштитна функција. Сметње које се јављају при напајању електричном енергијом, међусобни утицај уређаја и атмосферско пражњење могу довести до нерегуларности у раду потрошача. Системи напајања треба да спрече да сметња стигне до потрошача и поремети његов регуларан рад. При пројектовању хибридног система напајања неопходно је водити рачуна о квалитету и поузданости напајања у зависности од извора напајања, фактору снаге и хармонијских изобличења.

Квалитет електричне енергије представља поузданост у снабдевању електричном енергијом, односно непостојање трајних прекида, или временски кратких падова напона.

Обновљиви извори енергије су нестабилни извори енергије који могу нарушити квалитет и континуитет енергије за напајање потрошача. Хибридни систем напајања који користи два или више извора енергије даје већу поузданост и могућност стабилнијег напајања. Промена снаге на улазу у хибридни систем напајања не сме утицати на стабилност напајања потрошача, односно на напон и струју који се прослеђују потрошачима. Хибридни систем напајања који садржи и акумулаторски елемент (акумулаторску батерију) има већу поузданост напајања са становишта непрекидности.

5.2. Електромагнетна компатибилност телекомуникационог система

Посебан аспект квалитета електричне енергије је електромагнетна компатибилност. Може се дефинисати као способност једног електричног уређаја или система да ради у својој електромагнетној околини тако да не изазове недозвољену деградацију у функцији других уређаја или система у истој околини или да сам не буде ометан до те мере да се поремети његова основна функција. Да уређаји за напајање не би уносили сметње и реметили рад потрошача неопходно је да задовоље стандарде о електромагнетској компатибилности (SRPS EN 61204-3:2010). У хибридном систему напајања са више извора

енергије потребно је уградити потребне филтре и ЕМИ потискиваче како не би негативно утицали на рад опреме коју напајају.

Сметње којима је изложен електронски уређај могу бити подељене на три групе:

- Радијационе
- Кондуктивне
- Хибридне

Радијационе сметње настају утицајем:

- спољашњих електромагнетних поља,
- електромагнетне емисије из локалних извора електромагнетних поља.

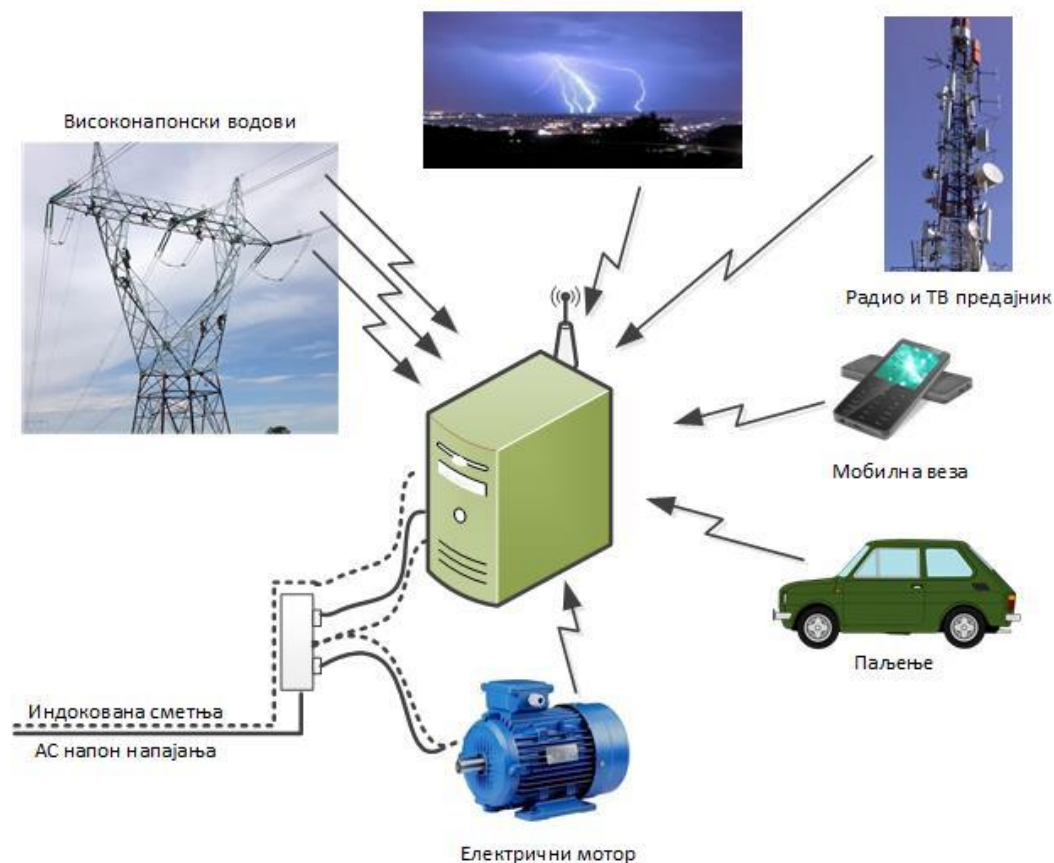
Кондуктивне сметње настају утицајем:

- кондуктивних шума које потичу из разних извора напајања,
- струјних кола које се затварају преко уземљења,
- електростатичког електрицитета (електростатичког поља).

Хибридне сметње настају услед:

- удара грома или утицаја услед удара грома,
- међусобног утицаја преносних водова.

Када сметње потичу од електромагнетног поља из спектра радиофреквенција онда се говори о RFI (*Radio Frequency Interference*) сметњама. Да би извор сметње изазвао утицај, мора постојати преносни пут између извора и пријемника. Потенцијални извори електромагнетних утицаја који се скраћено зову ЕМИ (*ElectroMagneticInterference*) сметње сликовито су представљени на слици 5.1. Може се уочити да на централну компоненту као што је радна станица, рачунар, делују ЕМИ сметње из различитих извора. Услед деловања сметњи може доћи до неправилног и неконтролисаног рада радне станице која се налази у центру деловања ЕМИ сметњи [54].



Слика 5.1. Деловање ЕМИ сметњи [54]

Начин преношења ЕМИ сметњи:

- 1) Проводници,
- 2) Спрега путем заједничке импедансе,
- 3) Спрега путем електричних и магнетних поља,
- 4) Преслушавање проводника,
- 5) Спрега путем напајања.

Смањење утицаја извора сметње могуће је решити у три нивоа:

- I ниво: Извор сметње

Оклопљавање или пројектовање извора сметњи са смањеним нивоом емитованих шума.

- II ниво: Преносни пут

Оклопљавање ако се ради о радијацији или филтрирање, ако се ради о кондукцији.

- III ниво: Пријемник сметње

Локално одвајање, изоловање, оклопљавање итд.

Сметње према нивоу (db), могу бити подељене у четири групе:

- 0-10 db – мали ниво сметњи. Отклања се филтером који редукује кондуктивне сметње, или оклопом који редукује ЕМИ.
- 10-30 db – значајан ниво сметњи који се смањује пажљивим избором елемената за филтрирање,
- 30-60 db - проблематичним ниво ЕМИ,
- изнад 60 db - захтева специјални квалитет филтара и оклопљавање уређаја.

Подаци релевантни за заштитне оклопе од RFI за разне материјале дати су у табели 5.1.

Табела 5.1. Материјали коришћени за оклопљавање - основни подаци [54]

/	Релативна проводност	Релативна пермеабилност на 100KHz	Апсорпциони губици db/0,025mm		
			100Hz	10KHz	1MHz
Сребро	1.05	1	0.03	0.34	3.40
Бакар	1.00	1	0.03	0.33	3.33
Злато	0.70	1	0.03	0.28	2.78
Алуминијум	0.61	1	0.03	0.26	2.60
Цинк	0.29	1	0.02	0.17	1.70
Никл	0.20	1	0.01	0.15	1.49
Бронза	0.18	1	0.01	0.14	0.42
Гвожђе	0.17	1.000	0.44	4.36	43.60
Челик	0.10	1.000	0.33	3.32	33.20
Хипернорм	0.06	80.000	2.28	22.80	228.00
Му-метал	0.03	80.000	1.63	16.30	163.00
Пермаллоу	0.03	80.000	1.63	16.30	163.00
Прохром	0.02	-1.000	0.15	1.47	14.70

Најбољу препреку електромагнетном зрачењу у области радиофреквенције представљају високопроводни немагнетни материјали. Такође, анализирајући податке о апсорпцији на разним фреквенцијама, закључује се да је најбоља заштита могућа комбинацијом високопроводних немагнетних материјала обложених са високо-пермеабилним материјалом.

Генерално, сметње се могу поделити на сметње које један уређај емитује на околину и имуност на сметње од уређаја у својој околини. И једна и друга група се контролишу са две групе мерења, односно мерењем поља сметњи и кондуктивних сметњи. Под пољем сметњи се подразумева утицај на уређаје преко израченог електромагнетног поља, а кондуктивне сметње представљају сметње које се простиру кроз проводнике са којима је уређај повезан на напајање и проводнике са којима је уређај повезан са потрошачима. Тестирање наведених појава се врше у Фарадејевом кавезу, мада се нека оријентациона мерења могу вршити и у лабораторијским условима [55].

ЕМИ потискивач који се примењује у уређајима за напајање треба да буду у специфичном фреквентном опсегу 0,1-100 MHz. ЕМИ шум (генерисан од IGBT, MOS-транзистора и тиристора у високострујним прекидачким AC/DC и DC/DC претварачима) припада MF (*Medium frequency*) опсегу (0,1-10 MHz). Како је шум доминантан у опсегу 0,1-100 MHz, импеданса у ЕМИ пригушивачима као што су ωL и $1/\omega C$ захтева велике вредности L и C . За индукторе L решење је да се користе већа феритна језгра, да се изаберу ферити веће магнетне пермеабилности (Mn-Zn ферити уместо Ni-Zn ферита), већи број завојака и одговарајући принцип потискивања. Још један проблем у индуктивним пригушивачима са феритима је висока вредност једносмерне компоненте струје. Да би се потиснули напонски пикови, мора се применити пораст самоимпедансе, магнетна интерференција или магнетна спрега са супротним калемовима.

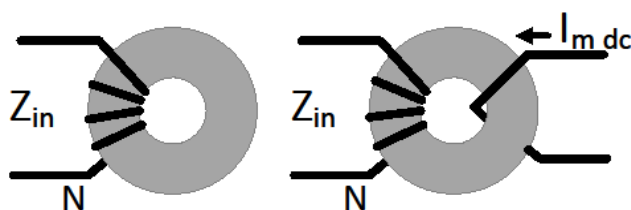
За потискивање сметњи у описаном решењу изабран је Mn-Zn ферит као магнетни материјал и произведено је велико, посебно дизајнирано цевасто феритно језгро са великим централним отвором за провлачење енергетског кабла (слика 5.2). Димензије изабраног језгра су: спољни пречник 20 mm, унутрашњи пречник 10 mm и дужина језгра 50 mm. Импеданса феритног језгра је мерена у режиму 0,1-100 MHz са једносмерном компонентом струје док се број завојака мењао. Затим је исто језгро мерено у импулсном режиму такође са једносмерном компонентом. Циљ је био да се оптимизује радна тачка и фреквентни опсег

потискивања за нови ЕМИ потискивач са спрегнутим језграма са краткоспојним калемом између два језгра [56].



Слика 5.2. Посебно дизајнирано цевасто феритно језгро [56]

На слици 5.3 је приказан модел феритног језгра које је коришћено при тестирању. Тестирање је вршено са феритним језгрима са намотаним различитим бројем завојака и феритним језгром кроз које је провучен додатни намотај кроз који се пропушта једносмерна струја (DC бијас).

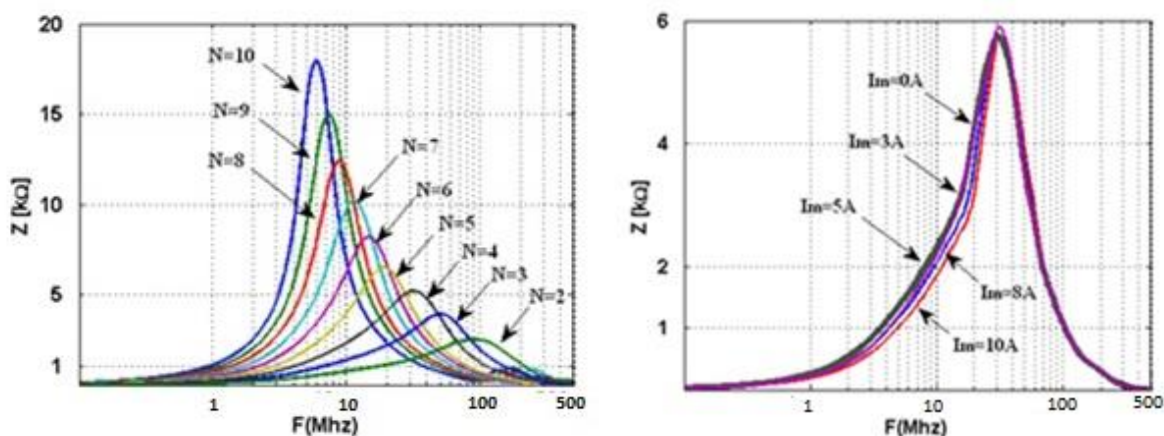


Слика 5.3. Модел феритног језгра за тестирање [56]

На слици 5.4а је приказана импеданса изабраног феритног језгра и зависност импедансе од броја намотаја. Променом броја намотаја мења се опсег учестаности у којем се уноси слабење сметњи. Повећање броја намотаја од 1 до 10 учестаност максималне импедансе се повећава, док се фреквенцијски опсег слабења смањује са 310 MHz на 6 MHz, што је представљено у табели 5.2. Да феритно језгро не би ушло у засићење, потребно је смањити импедансу индуктивне компоненте, односно смањи број намотаја. Зависност импедансе од величине струје која се пропушта кроз пригушницу приказана је на слици 5.4б и представљена у табели 5.3. На слици 5.4б уочава се да се импеданса мења од око 2 до 6 kΩ за 10 до 50 MHz што даје смањење од 32,4 до 40 dB. Добијено смањење је довољно да би се користило у уређајима за напајање. Повећањем једносмерне струје која се пропушта кроз језгро, са 1 - 10 A, смањује се опсег потискивања са 26,6 на 25,8 MHz.

Један или више намотаја на истом феритном језгру, која су супротно намотана, могу се користити као посебни филтри. У том случају, главна струја је подељена на две половине јер су супротне намотане завојнице магнетно спрегнуте феритним језгром. Произведени магнетни флуksi су у супротним смеровима тако да су импулси сметње интерферирају. Два феритна језгра се такође могу спојити спајањем кратког споја између њих. На овај начин формирано је двоструко језгро које представља нови магнетни филтар. Могуће је формирати различите конфигурације, за потискивање сметњи као што је приказано на слици 5.5.

Анализирано је неколико различитих начина мотања индуктивне компоненте приказаних на слици 5.5. Број намотаја је фиксиран на 4 јер, за струје од 1-10 А јер феритно језгро има радну тачку која је на половини пута од почетног стања до стања засићења па може да слаби кондуктивне импулсне сметње интензитета и до 20 А. Импулсни одзиви зависе од коришћеног принципа потискивања и конфигурације намотаја на феритним језграма. Конфигурација А (слика 5.5) има само један калем и дејство феритног склопа на узлазну и силазну ивицу импулса је експоненцијалано потискивање, односно слабљење, док конфигурација Б има ауто-магнетну интерференцију са два супротна намотаја. Два сигнала у контра фази на истом магнетном језгру, као у конфигурацији Б, се често користе за потискивање шума нагиба импулса сметњи код предње ивице (кашњење) за узлазну ивицу. Формирање краја за силазну ивицу је два пута веће за Б конфигурацију у поређењу са А конфигурацијом (са једним калемом) [56].



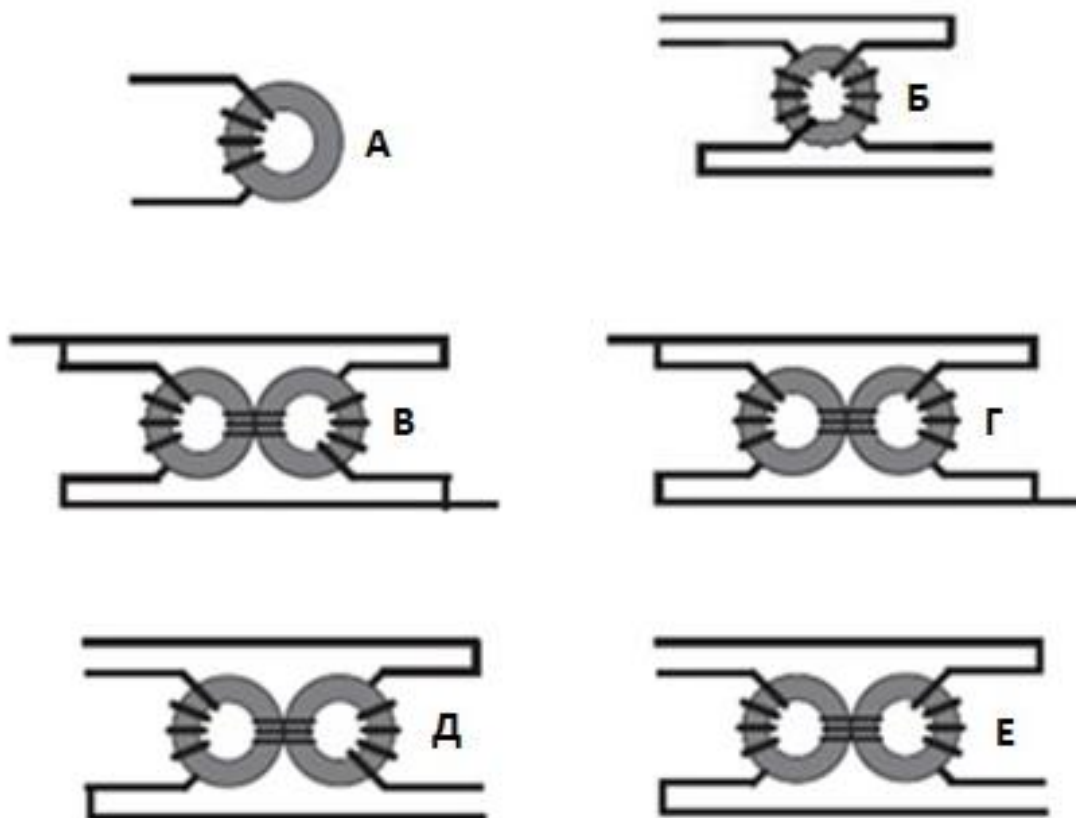
Слика 5.4 (а) Зависност импенансе индуктивне компоненте од броја намотаја,
(б) зависност импедансе од јачине струје [56]

Табела 5.2. Импеданса феритног језгра округлог кабла у односу на фреквенцију за различит број намотаја

N	Z_m	F_m	F_1	F_2	$f=F_2-F_1$
	$[\Omega]$	$[MHz]$	$[MHz]$	$[MHz]$	$[MHz]$
1	988	308	44.61	404.1	359.5
2	2497	93	42.52	153.37	110.8
3	3918	50	27.92	78.01	50.08
4	5192	32	17.48	50.68	33.21
5	6489	19	11.51	29.37	17.86
6	8196	15	9.35	22.15	12.8
7	10218	11	7.68	16.53	8.85
8	12387	8.8	6.31	12.27	5.96
9	15021	7.4	5.49	9.86	4.37
10	17966	5.9	4.59	7.7	3.11

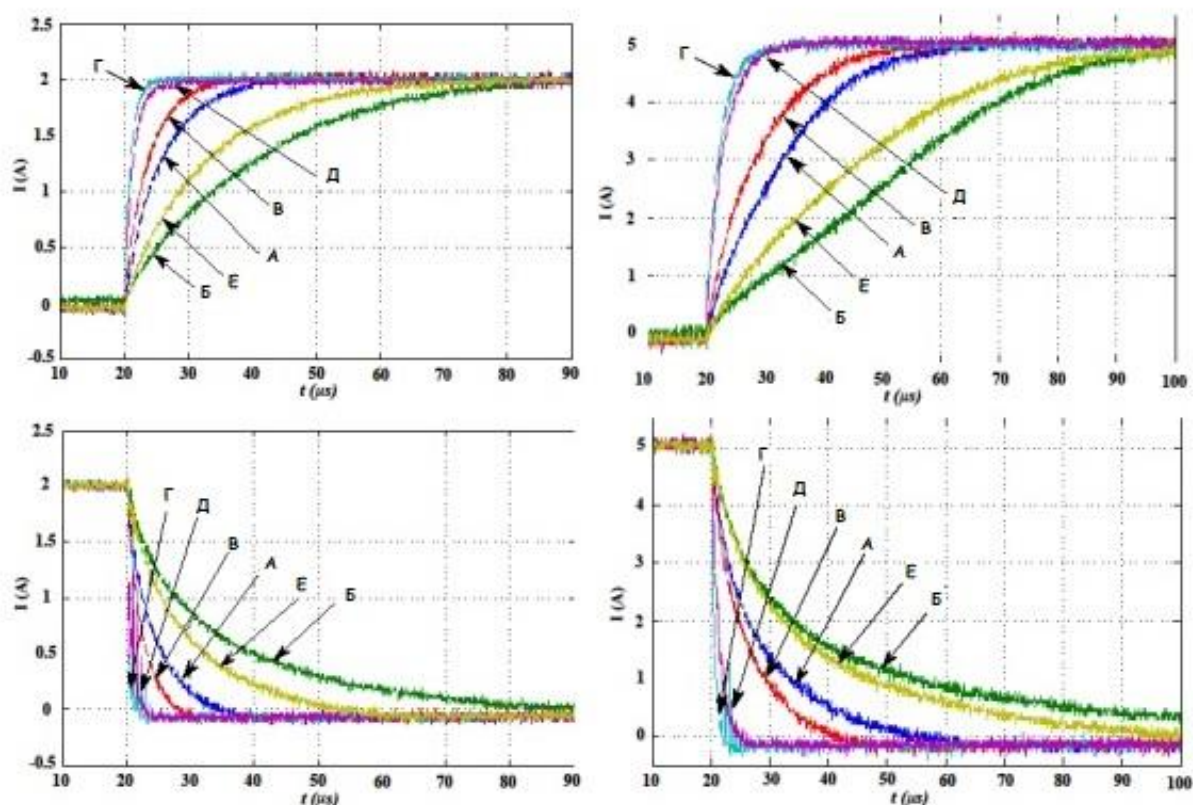
Табела 5.3. Импеданса феритног језгра округлог кабла у односу на фреквенцију за различиту струју

I_m	Z_m	F_m	F_1	F_2	$f=F_2-F_1$
$[A]$	$[\Omega]$	$[MHz]$	$[MHz]$	$[MHz]$	$[MHz]$
0	5902	31.2	18.93	45.57	56.64
3	5798	31.3	19.13	45.81	26.68
5	5756	31.4	19.86	46.32	26.46
8	5748	30.4	21.17	47.55	26.38
10	5734	30.5	22.81	48.57	25.76



Слика 5.5 Различити начини мотања индуктивне компоненте RSO филтра [56]

Одзив за различите конфигурације, приказане на слици 5.5, у импулсном режиму за струје од 2 А и 5 А су дате на слици 5.6 за узлазну и силазну ивицу, респективно. Број завоја супротних калемова фиксиран је на 4. Импулсни одзиви зависе од коришћеног принципа потискивања и конфигурације намотаја на феритним језграма. Конфигурација А приказана на слици 5.5 има само једну завојницу и одзив је експоненцијалан, док конфигурација Б има самомагнетну интерференцију са две супротне завојнице, што се често користи у филтрима.



Слика 5.6 Импулсни одзив на узлазну и силазну ивицу ($I = 2$ А (лево) и 5 А (десно)) за различите конфигурације и $N = 4$ намотаја [56]

Остале конфигурације су формиране са два феритна језгра спојена са 10 завоја (слика 5.5). У случају конфигурација В и Г струја је подељена на две половине пролазећи кроз завојнице намотане у истом, односно супротном смеру. Конфигурација Д суперпонира магнетне флукове из оба језгра у краткоспојном калему спреге без сметњи, док конфигурација В интерферира магнетне флукове и значајно мења прву ивицу и крај одзива. Ефекат кашњења је нешто мањи за конфигурацију В у поређењу са Б пошто је струја калема нижа по интензитету. Конфигурације Д и Е су сличне индуктивним линијским филтерима по позицијама намотаја. У овом случају су ефекти магнетизације већи јер струја није подељена на две половине као код конфигурације Б. Струје (попут фазе и нуле) пролазе кроз калемове на различитим језгрима и магнетни флукови су интерферирани у калему спреге за конфигурацију Е. У случају конфигурације Д магнетни флукови су суперпонирани и ефекат на прву ивицу је занемарљив. Конфигурација Е има нешто мањи утицај на прву ивицу и крај одзива од конфигурације Б. Међутим, има више простора за

постављање проводника већег попречног пресека, мањи број намотаја и омогућава да кроз феритни калем прође много већа струја [56].

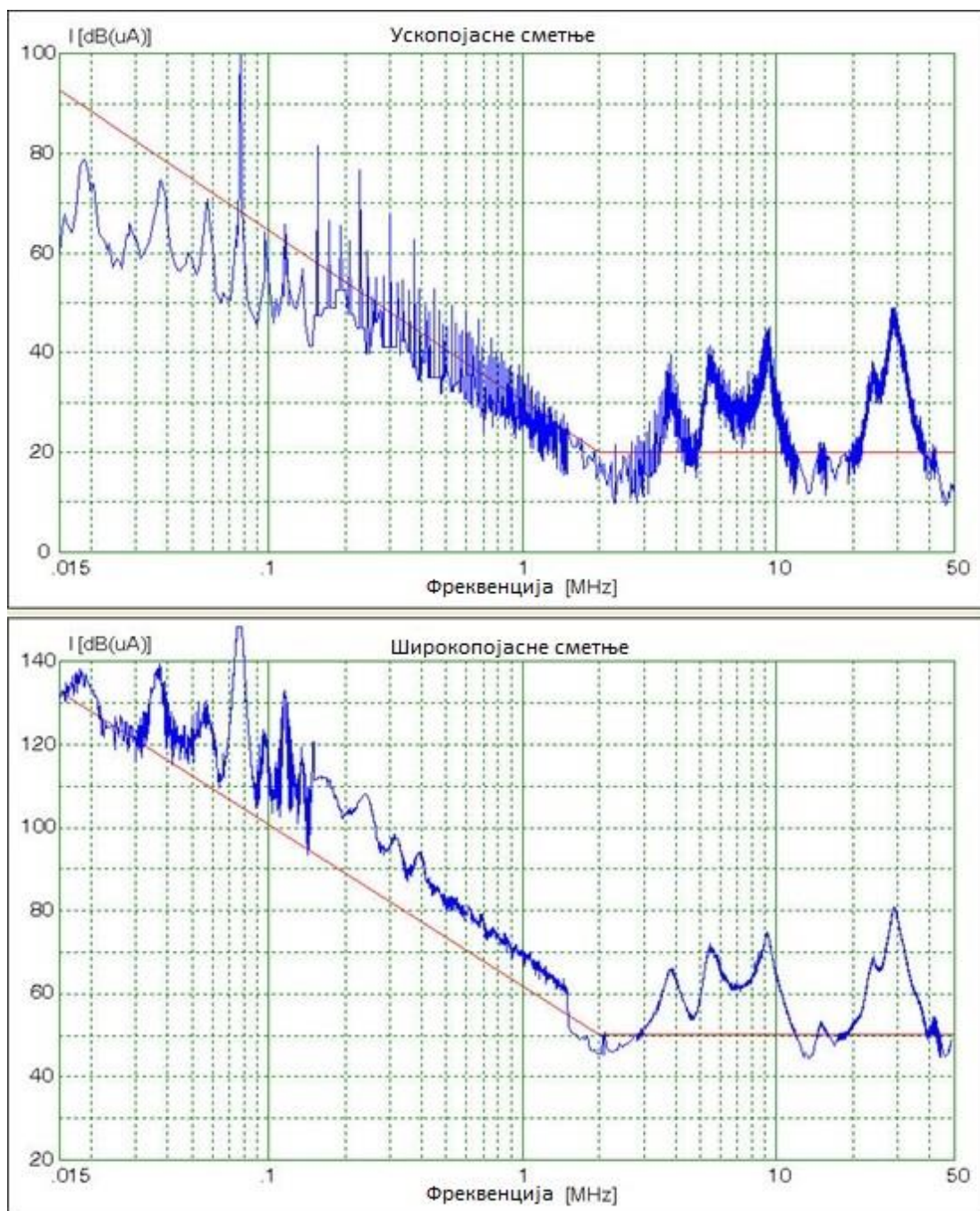
На овај начин направљен је индуктивни филтар који се поставља на каблове без коришћења великих кондензатора. Анализирано феритно језгро коришћено је за потискивање сметњи у хибридном систему напајања који је описан у дисертацији.

5.2.1. Кондуктивне сметње хибридног система напајања

Путеви емитовања зрачења су проводници којима је уређај повезан са основним извором напајања, резервним извором напајања (батерије) и проводници према потрошачима.

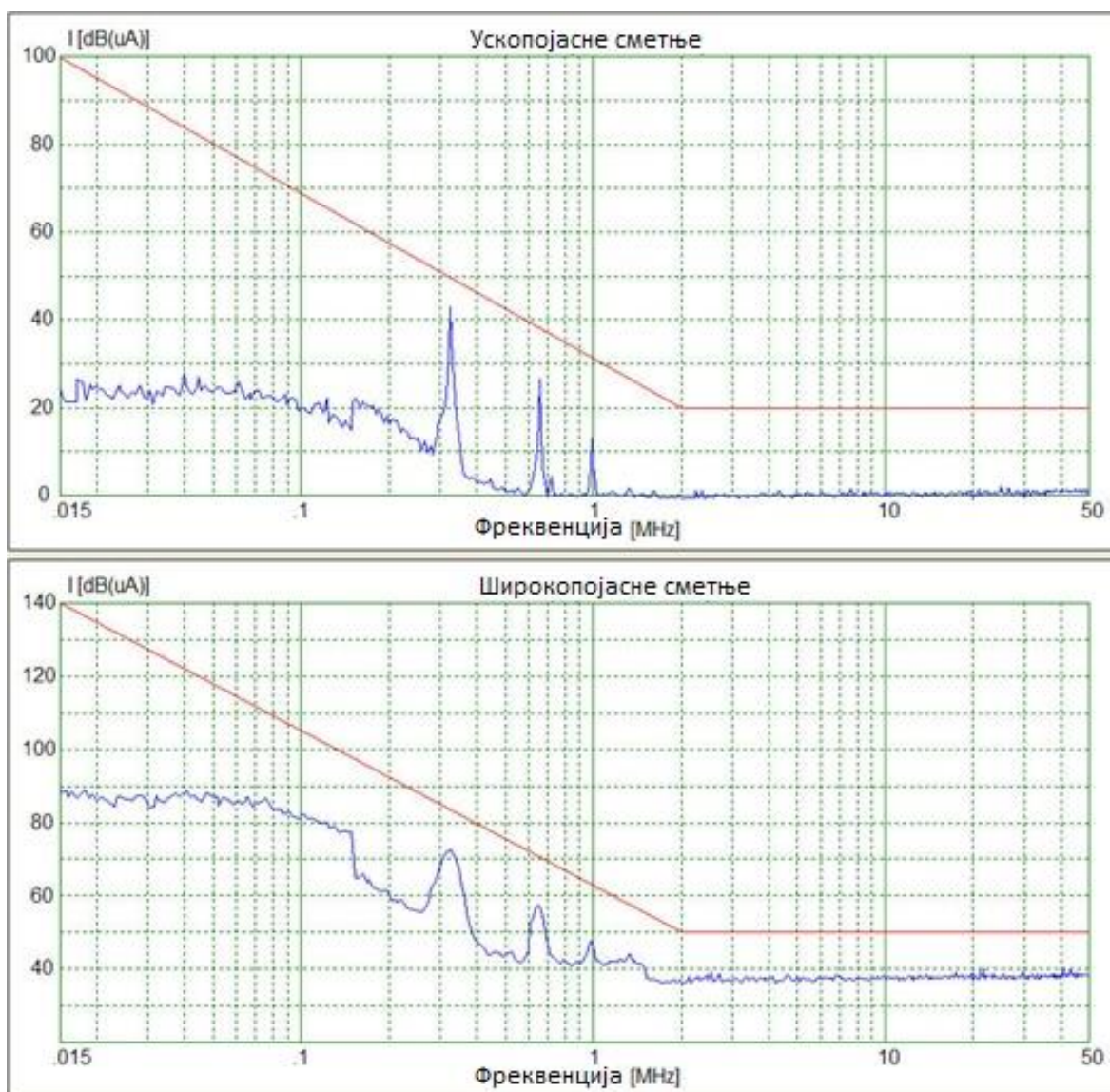
Проблем решавања кондуктивних сметњи се знатно компликује уколико се решава за систем напајања. Хибридни систем напајања се састоји од елемената који сваки доприноси повећању нивоа кондуктивних сметњи. Сваки појединачни елемент поседује бар један претварач који ради у прекидачком режиму и контролер чиме се повећава ниво сметњи.

Снимљен спектар сметњи за систем напајања приказан је на слици 5.7. Кондуктивне сметње су у широком опсегу изван дозвољених вредности (гранична вредност означена је црвеном линијом). Да би се анализирао утицај различитих филтара коришћен је RSO (*Reactive Search Optimization*) филтар који потискује кондуктивне сметње у одговарајућем фреквентном опсегу.



Слика 5.7. Спектар кондуктивних сметњи за систем напајања мерено пре уградње RSO филтра

График измерених кондуктивних сметњи на уређају након уградње RSO филтара приказан је на слици 5.8.



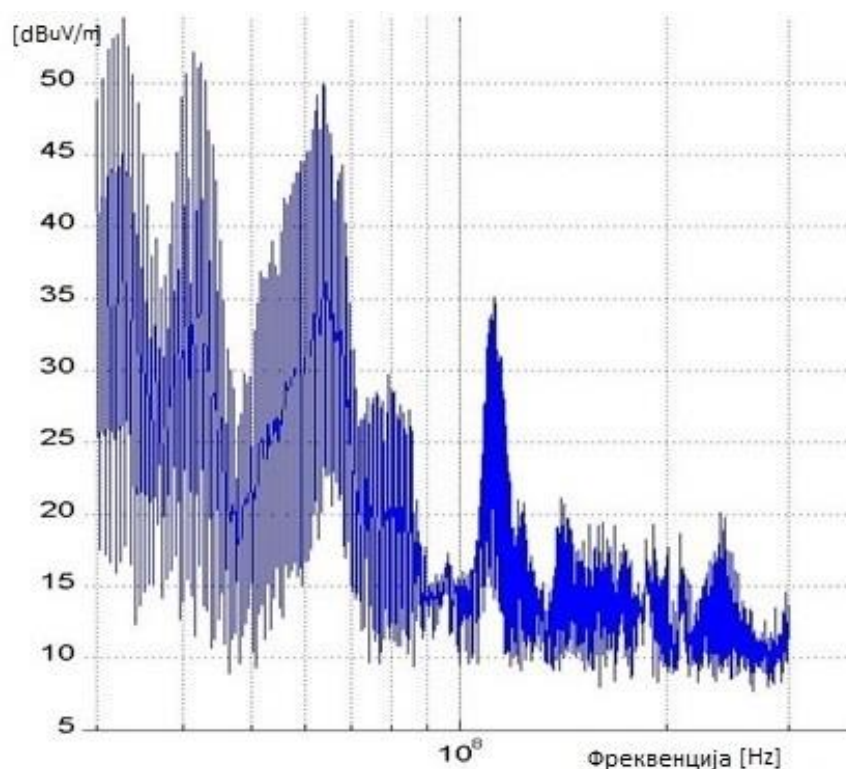
Слика 5.8. Кондуктивне сметње за сиситем напајања након уградње RSO филтра

Након уградње филтра, спектар сметњи се смањио и налази се унутар дозвољених вредности које су на слици 5.8 означене црвеном линијом. Гранична вредност се линеарно смањује од 100 до 20 [dB(μ A)] за ускопојансе сметње, односно од 140 до 50 [dB(μ A)] за широкопојасне сметње, у опсегу од 15 kHz до 2 MHz. На фреквенцији већој од 2 MHz, гранична вредност је константна. Филтар је потиснуо сметње у целом мереном опсегу.

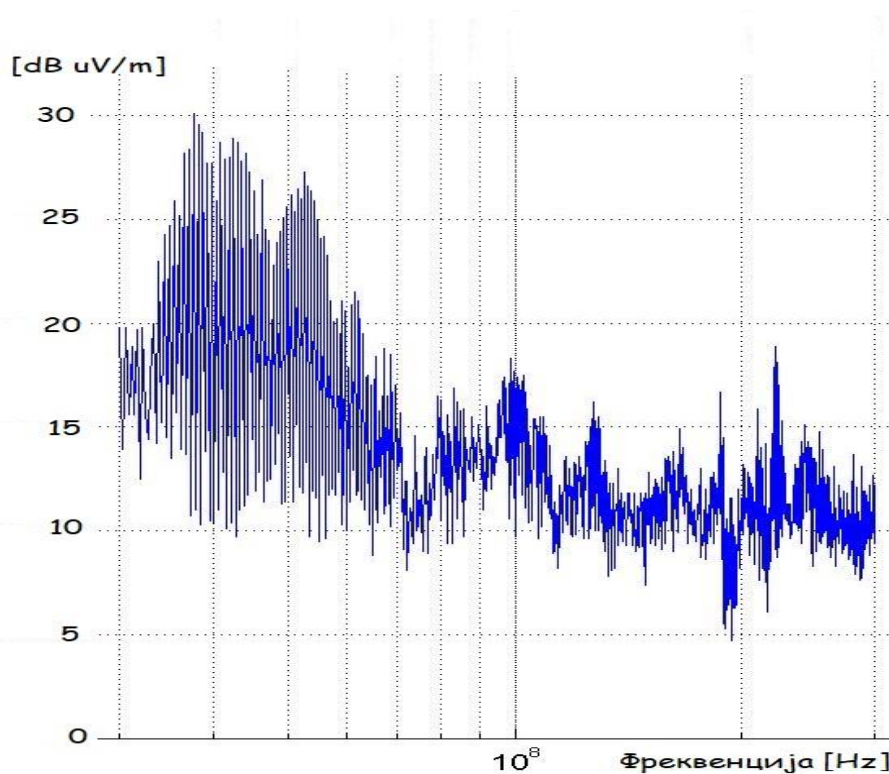
5.2.2. Поље сметњи

Утицај поља сметњи се отклања додатном заштитом елемената система који су значајни извори зрачења. Након што је додат RSO филтар приказан на слици 5.2, урађено је тестирање и утврђено је да су доминантни извори поља сметњи проводник путем ког је уређај повезан са заштитним уземљењем, проводник којим је повезан потрошач и проводник којим је уређај повезан на примарно напајање.

Резултат тестирања поља сметњи пре интервенције на уређају приказан је на слици 5.9. Поље сметњи је тестирано у канцеларијским условима тако се вредности у dB не поклапају са вредностима из стандарда SNO1029-89. Овај начин тестирања се може искористити као контрола пре тестирања у овлашћеној институцији.



Слика 5.9. Спектар поља сметњи мерено у лабораторијским условима пре интервенције на уређају

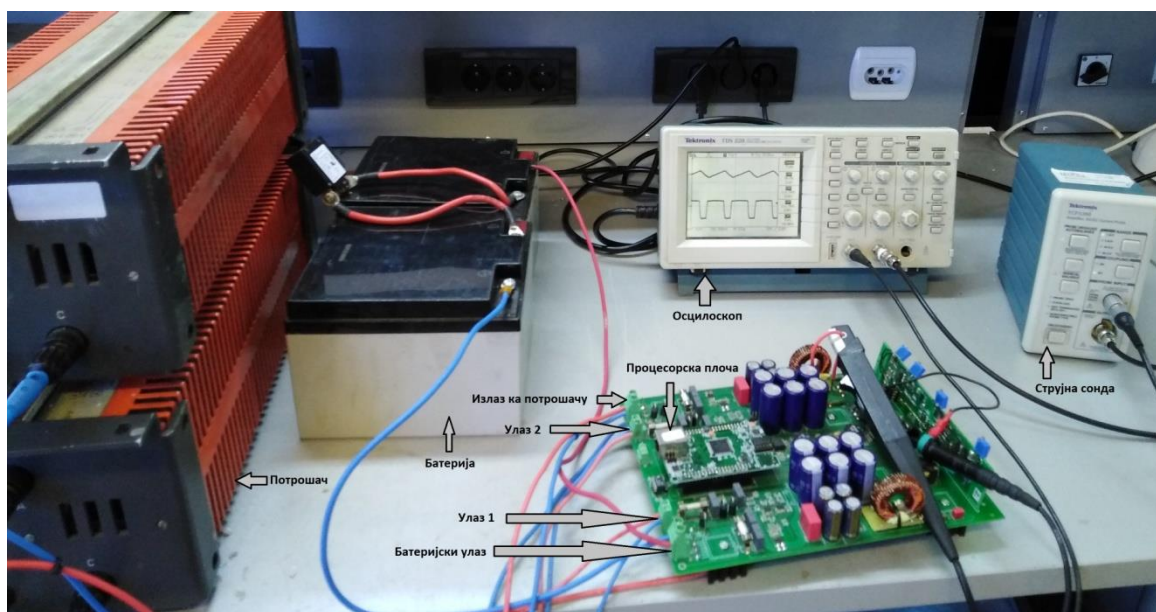


Слика 5.10. Спектар поља сметњи мерено у лабораторијским условима након интервенције на уређају

Смањење кондуктивних сметњи утицао је на резултат мерења поља сметњи. Да би се смањио спектар поља сметњи мора се извести повезивање уређаја на главни вод заштитног уземљења. Такође, извршена је додатна заштита (ширмовање) кабла како би се смањило зрачење. Квалитетни проводници којим се уређај повезује са извором напајања или са потрошачем имају један или два слоја изолације и један или два слоја ширма. Побољшања су добијена ширмовањем свих проводника који су повезани на уређај, тако да се спектар сметњи смањио за више од 25dB(μ V). Након интервенција на уређају добијен је дијаграм сметњи приказан на слици 5.10. Спектар сметњи на фреквенцијама мањим од 100 MHz је на графику на слици 5.9 достигао вредности и преко 50 dB (μ V/m) на вредност испод 30 dB (μ V/m). Након 100 MHz, спектар шума је износио 35 dB (μ V/m) да би се након интервенције на уређају вредност смањила на приближно 17 dB (μ V/m). Упоредивањем графика са слике 5.9 и 5.10 уочава се и смањена густина спектра шума у целом мереном опсегу.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛАНА АНАЛИЗА

Окружење на којој су извршена тестирања приказано је на слици 6.1. Два обновљива извора енергије, ФН систем 600 W, мали ветроагрегат 5 kW (са исправљачем) и један хемијски извор (акумулаторска батерија капацитета 100 Ah) повезана су на плочу преко два програмабилна претварача. Као потрошач коришћен је реостат, максималне снаге 250 W.



Слика 6.1. Експериментална поставка

Реализовано решење чија је блок шема представљена у поглављу 4, на слици 4.1, приказано је на слици 6.2. На плочи су монтирана два DC/DC претварача са конекторима за повезивање обновљивих извора енергије (улаз 1 и улаз 2), улаз за прикључење батерије и излаз за повезивање потрошача. Реализовани хибридни систем напајања има за циљ коришћење снаге из обновљивих извора енергије, а да се при томе обезбеди потребна снага потрошачима. Вишак енергије се складишти у акумулаторској батерији. Реализована конфигурација се користи за напајање потрошача који користе једносмерни напон напајања. Процесорска плоча (слика 6.2) има улогу прикупљања потребних мерених величина у систему, затим извршавања предложеног фази алгоритма и реализованих регулатора и коначно генерисање извршних дигиталних PWM сигнала преко којих се управља DC/DC претварачом и његовим излазним напоном.

Процесорска плоча је реализована са 16-битним дигиталним сигнал контролером *dsPIC33FJ64GS606* произвођача *Microchip Technology Inc.* Аритметичко логичка јединица

је снаге 40MIPS-а (*Milion Instruktions per second*). Контролер има 64 KB (килобајта) програмске *Flash* меморије и 8 KB RAM меморије за податке. Периферије битне за примену на пројекту су:

- 9 комплементарних парова PWM (*Pulse Width Modulation*) сигнала чија је резолуција 1 ns.
- ADC – аналогно дигитални претварач са 24 улаза и 10-битном резолуцијом.
- 4 аналогна компаратора са малим кашњењем.
- DAC – четири дигитално аналогна претварача са 10-битном резолуцијом.
- 5 тајмера са 16-битном резолуцијом.
- Четири DMA (*Direct Memory Access*) канала за директан приступ меморији.
- Комуникациони интерфејси:
 - 2xUART (*Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*) за серијски пренос података,
 - 2xSPI (*Serial Peripheral Interface*) за комуникацију са периферијом,
 - 2xI2C двосмерне двожишне серијске сабирнице које се користе за пренос података између периферије на процесорској плочи,
 - 2 x CAN (*Controller Area Network*) за серијску комуникацију.
- 58 улазно излазних пинова опште намене.

Програм је писан на језику C, без оперативног система. Компајлер XC16 i IDE (*Integrated Development Enviroment*) MPLAB-X су производи *Microchip Technology Inc.*



Слика 6.2. Реализовано решење хибридног система напајања

Хардверски део поставке се састоји из два неизолована спуштача напона (DC/DC претварача). Излазни напон спуштача напона је мањи од улазног напона. С обзиром да су улазни напони које дају обновљиви извори променљиви (унутар опсега 33-108V), али увек већи од напона батерије и потрошача, ова топологија је изабрана као погодна најпре због своје једноставности. Напон батерије може да се мења у процесу пуњења батерије константом струјом од 21V (испражњена батерија) до 28.8V (максимална вредност напона батерије). Када се заврши процес пуњења, претварач регулише напон батерије на константој вредности напона од 27.3V (напон одржавања батерије). Мерени сигнали улазних и излазних величина (напони и струје) се воде на процесорску плочу где се извршава предложени алгоритам за управљање хибридним системом напајања, који дефинише вредности излазног напона, односно снаге која је потребна да се генерише. Излазним напоном претварача се управља преко дигиталног PWM сигнала, константне фреквенције ($f_s = 150 \text{ kHz}$) и променљивог фактора попуне. Управљањем фактора попуне, односно времена вођења транзистора у току једног прекидачког циклуса, регулише се излазни напон на задату вредност.

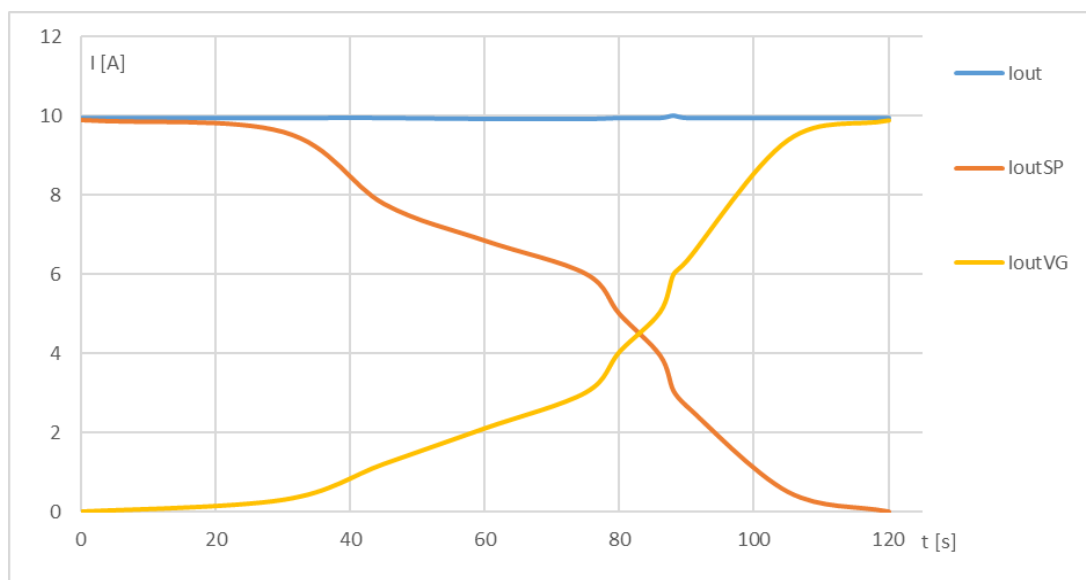
Циљ повезивања различитих извора енергије је да потрошачима буде испоручена потребна енергије. Алгоритам рада подразумева сталну проверу снаге потребне

потрошачима и напона акумулаторске батерије. Уколико има довољно расположиве снаге комбинујући различите расположиве изворе напајања, врши се и допуњавање акумулаторске батерије.

Експериментална анализа извршена је на поставци приказаној на слици 6.1. Кроз експерименте потврђена је реакција система, односно промена излазне струје претварача, при промени снаге која се добија из извора. У току експеримента, вредност снаге потребне потрошачима је била приближно константна, као и вредност струје пуњења батерије.

У току експеримента, ФН панели су имали различит осветљај, а самим тим се мењала снага која може да се добије из ФН система. Уколико оба основна извора напајања нису имали довољну снагу за напајање потрошача, у систем се укључивала батерија.

Резултат првог експеримента приказан је на слици 6.3. Струја потребна потрошачима је константна, око 10А а SOC је високо тако да није потребно допуњавање батерије. Када се осветљај ФН панела смањује, укључује се ветроагрегат како би се надокнадила енергија која недостаје за напајање потрошача. Струја претварача на који је повезан ФН систем, опада, док струја претварача на који је повезан ветроагрегат расте што се може уочити на слици 6.3. Собзиром да је SOC високо, струја батерије је једнака нули.

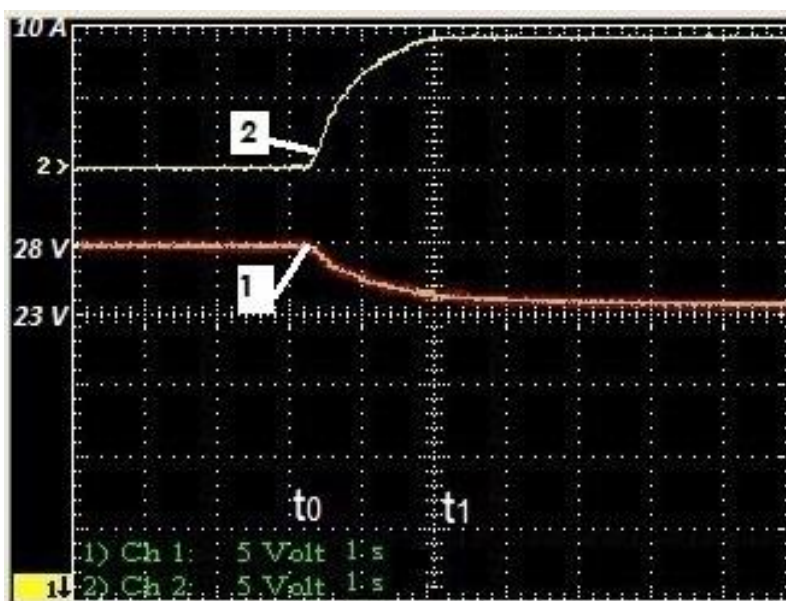


Слика 6.3. Дијаграми излазних струја серијских претварача

У другом и трећем експерименту ФН систем не даје снагу, тако да се потрошачи напајају из ветроагрегата и акумулаторске батерије.

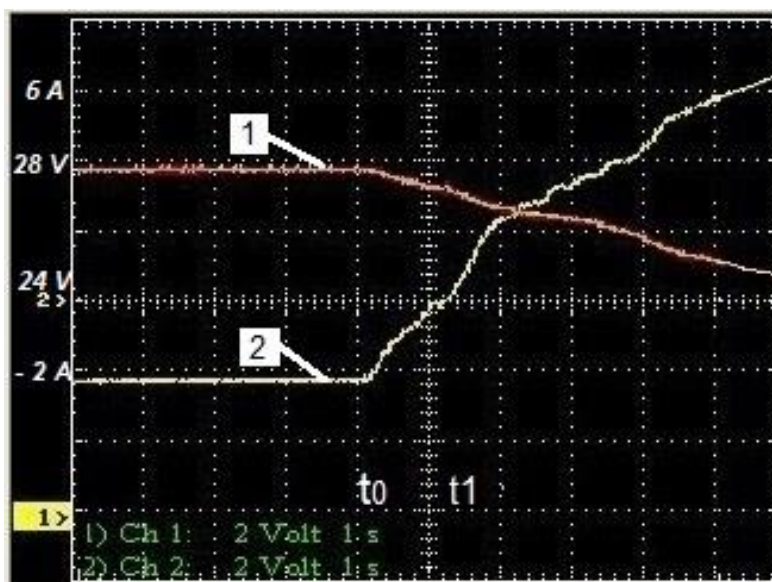
Снимљене вредности напона и струје потрошача и акумулаторске батерије, у прелазним режимима (тј. прелазак са обновљивих извора на батеријско напајање и обрнуто), приказани су на сликама 6.4, 6.5 и 6.6.

Крива измереног напона на батерији при преласку на батеријско напајање приказана је на слици 6.4 (график означен са 1). Вредност напона је износила приближно 27,6 V који се одржавао до момента када су ФН панели остали без осветљаја, односно када ветроагрегат и ФН систем нису имали довољно снаге за напајање потрошача. При овом мерењу, ветроагрегат није имао довољну излазну снагу и практично је био ван функције, док је излазна снага ФН система нагло опала. Како би се једноставно приказао прелаз са обновљивих извора на напајање из батерије снимљени су напон и струја батерије. Измерена вредност струје на батерији приказана ја на слици 6.4 (график означен са 2) с тим да вредност подеока на графику осцилоскопа од 1 V одговара вредности струје од 1 A. До тренутка t_0 , струја батерије је нула ($I_b \approx 0A$). Након тренутка t_0 , струја тече из батерије до вредности од око 10A (тренутак t_1), кад батерија преузима напајање потрошача. Истовремено, батерија се празни и напон батерије се смањује на номиналну вредност од приближно 24 V.



Слика 6.4. Напон и струја батерије - прелазни режим напајања потрошача из батерије.

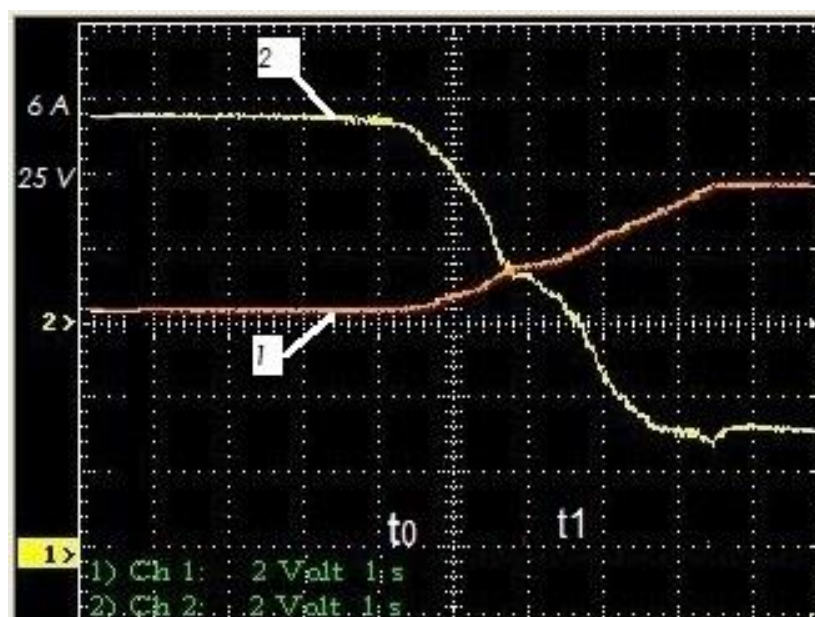
У трећем експерименту, време преласка са обновљивих извора енергије на батерије је трајало неколико секунди. Напон и струја батерије при промени извора енергије приказани су на слици 6.5.



Слика 6.5. Напон и струја батерије у прелазном режиму са обновљивих извора на батерије

График означен са 1 (слика 6.5) приказује напон на батерији, који је износио приближно 27,6 V, а затим се, од тренутка t_0 , смањивао како се батерија празнила. У току тестирања, коришћене су батерије мањег капацитета како би се период пражњења могао снимити осцилоскопом. На графику означеног са 2 приказано је мерење струје батерије. Током прелазног периода од t_0 до t_1 , (слика 6.5), осветљење ФН система постепено опада, ветроагрегат нема снагу да компензује недостатак снаге потребне за оптерећење, те се снага надокнађује из батерије. Док постоји довољно енергије из обновљивих извора, батерија се пуни константном струјом (до t_0), а када се смањи снага која се добија из обновљивих извора, струја пуњења батерије се смањује. Струја батерије у тренутку t_1 је једнака 0 A. Смер струје се тада мења и тај смер је ка потрошачу.

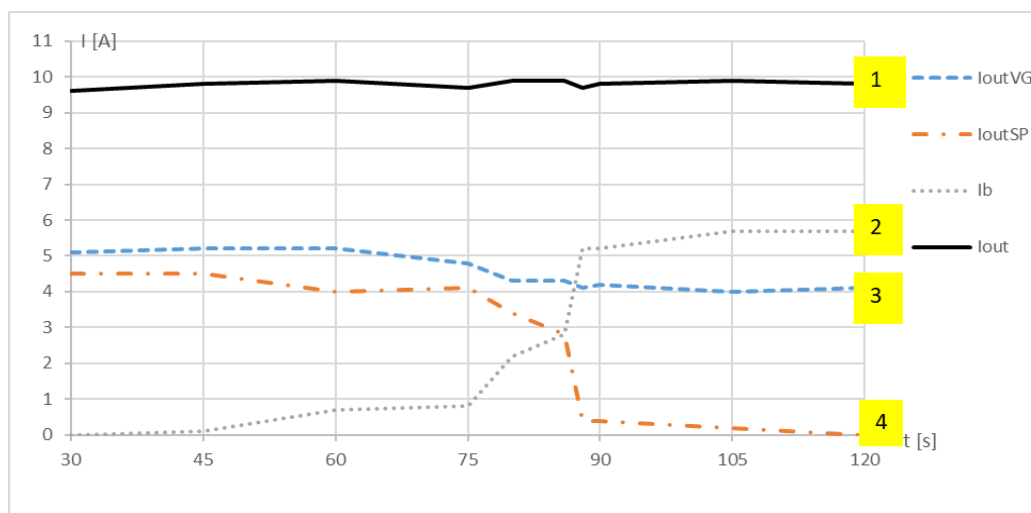
Експеримент у којем се потрошачи напајају из батерије, а затим из обновљивог извора енергије приказан је на слици 6.6. Струја батерије износила је приближно 5,6 A, јер је ветроагрегат генерисао излазну струју од око 4,4 A. До тренутка t_0 батерија је била скоро празна. У тренутку t_0 енергија ФН система почиње да расте, и ФН систем преузима напајање потрошача. У тренутку t_1 ФН систем је од батерије преузео напајање потрошача и генерисао довољно снаге да може да допуњава батерију. Напон на батерији, приказан на графику означеним са 1 (слика 6.6), је брзо порастао од тренутка када се ФН систем укључио јер се батерија растеретила. Како је снага добијена из обновљивих извора расла тако се повећавала и вредност струје пуњења батерије, а самим тим и напон на батерији.



Слика 6.6. Напон и струја батерије у прелазном режиму са батеријског на обновљиве изворе напајања

Период у којем се снага добијена са ФН система смањује, а ветроагрегат не даје довољно снаге па се енергија потребна потрошачима надокнађује из батерије приказан је на слици 6.7. На дијаграму су представљене излазне струје сва три извора напајања (ФН систем, ветроагрегат и батерија) као и укупна струја потрошача.

Струја потрошача је у овом експерименту била константна, око 9,8 А (график означен са 1, слика 6.7), излазна струја претварача на који је повезан ветроагрегат се мења од 5,2 А до 4 А, што је недовољно за напајање потрошача (график означен са 3, слика 6.7). Потрошачи се напајају из два извора енергије, ветроагрегата и ФН система првих 45 секунди (график означен са 4, слика 6.7). Од тог тренутка, излазна струја претварача на који је повезан ФН систем почиње да опада до 75. секунде (график означен са 4, слика 6.7), када почне нагло да пада и до 90. секунде ФН систем не даје снагу за потрошач. На графику (означен са 2, слика 6.7) се види да струја из батерије расте, односно потрошачи се напајају и из батерије. Од 90. секунде, када ФН систем не генерише струју за потрошач, батерија преузима улогу извора напајања. На основу резултата спроведених експеримената, струја потрошача (график означен са 1. слика 6.7) је константна и нема пропада, очекује се стабилно и непрекидно напајање потрошача.



Слика 6.7. Дијаграм излазне струје према најгорем сценарију хибридног извора напајања.

Експериментални резултати потврђују теоретска очекивања и резултате добијене симулацијом која је описана у поглављу број 4. Описани систем реагује на промене расположиве снаге која се добија из обновљивих извора енергије и укључује потребне изворе или батерију тако да потрошачи не осете промену извора напајања. Располагаива снага обновљивих извора се користи за напајање потрошача и контролисано прослеђује за пуњење батерије.

7. ЗАКЉУЧАК

Предности описаног хибридног решења за напајање телекомуникационе опреме заснована је на имплементацији контролера на бази фази логике. Упоређивањем расположиве снаге која се добија из обновљивих извора енергије и снаге потребне потрошачима процењује се снага која треба да се преузме из сваког извора како би се постигло ефикасно коришћење енергије. Сунчева светлост, преко ФН панела, представља основни извор енергије. Подешавањем референтне вредности претварача, дефинише се снага која се узима из расположивих извора енергије, како би се добило економски најисплативије решење. Референтна вредност претварача одређује се фази логиком. Помоћу дефинисаних фази правила процесор подешава режим рада и израчунава вредност снаге коју треба да генерише сваки извор. У временским интервалима када је потребно користити максималну снагу извора, користи се MPPT режим рада претварача. Ако је максимална снага серијског претварача на који је повезан ФН систем недовољна да задовољи потребе потрошача, недостајућа енергија се надокнађује из ветроагрегата. У најгорем случају, када укупна количина енергије која се добија из обновљивих извора није довољна, део снаге која је потребна за континуално напајање потрошача додаје се из акумулаторске батерије. Због режима рада у које се постављају батерије у хибридним системима, морају се користити батерије које издржавају велики број пуњења и пражњења, а по капацитету омогућавају напајање потрошача у дефинисаном временском периоду.

Имплементација контролера на бази фази логике, описана у дисертацији, омогућава добро праћење максималне снаге извора користећи балансирање снаге, приоритет напајања и максималну уштеду коришћења батерије како би пад напона током прелазних периода остао у опсегу дозвољених вредности. Баланс улазне и излазне снаге израчунава се на основу расположиве снаге из обновљивих извора, снаге на излазу DC/DC претварача, потребне снаге за пуњење батерије и тренутне потребе за напајање потрошача.

Хибридни систем напајања, описан у дисертацији, се може упоредити са решењем у [57], где је примењена фази логика. Реализовани систем има мали пад напона и краткотрајна прелазна стања. На основу резултата спроведених експеримената очекују се добре перформансе у временским периодима преласка са једног на други извор енергије тако да потрошачи не осете промену напајања. Експерименталан анализа индицира добре

перформансе и у најгорем случају када је допринос ветра и сунца заједно недовољан, па се енергија надокнађује из батерије, као што је приказано на слици 6.5.

Примери планирања, симулације и оптимизације хибридних електроенергетских система са три или више обновљивих извора енергије, као што је описано у поглављу 3, указују на потребу за хибридним системима напајања који користе обновљиве изворе енергије.

Систем напајања са контролером на бази фази логике може се применити на напајање телекомуникационе опреме у удаљеним подручјима где примарно електродистрибутивно напајање није доступно. Описани систем омогућава управљање са два серијска претварача на које су повезани различити извори енергије. Праћењем улазних и излазних параметара извора енергије и потребе потрошача, контролер дефинише режим рада. Собзиром да доступна енергија из обновљивих извора енергије није увек предвидива промене параметара рада морају да буду дефинисане да се не поремети рад потрошача. У зависности од доступности енергије из различитих извора, потреба потрошача и батерија, неопходна је уравнотежена употреба расположиве енергије и допуњавање батерије.

За потискивање електромагнетних сметњи тестиран је ферит са Mn-Zn округлим језгром како би се утврдила могућност за коришћење у различитим претварачима. Добијени резултати су показали да феритно језгро мења својства са променом фреквенције а у складу са променом броја намотаја и струјом која се пропушта кроз језгро. Облик и величина језгра такође играју важну улогу у индуктивности, радној тачки хистерезисне петље и паразитној капацитивности између намотаја (завоја). Испитана је и анализирана оптимална импеданса и принцип рада потискивања. Једно језгро и двоструко спрегнута језгра (конфигурације Д и Е на слици 5.5) показују најбољу супресију комутационог шума у режиму импулса/струје.

У шестом поглављу докторске дисертације је представљено решење за повезивање два обновљива извора енергије и акумулаторске батерије. Хибридни систем напајања је димензионисан на основу снаге потребне за напајање потрошача и пуњење батерије. За брзе промене енергије из различитих извора енергије и контролисано управљање енергијом, примењен је контролер на бази фази логике. Допуњавање батерије је дефинисано према захтевима правилног одржавања, али зависи од расположиве енергије из обновљивих извора енергије и енергије која је потребна потрошачима. У случају промене снаге коју обезбеђују извори енергије реализовани хибридни систем напајања реагује тако да

комбинује снагу добијену од расположивих извора и акумулаторску батерију тако да се потрошачима обезбеди напајање. Контролер на бази фази логике се показао као добро решење за промене улазних параметара што је потврђено и у радовима описаним у поглављу три. У радовима [30] и [31], у системима напајања са ФН панелом, коришћен је контролер на бази фази логике. Улаз у контролер у [30] је разлика излазне струје соланих панела у једном периоду одмеравања, а излаз је промена фактора испуне. У раду [31] контролер управља фактором оптерећења и фреквенцијом управљачког сигнала претварача. На овај начин излазни напон ФН панела се мења променом фактора испуне у зависности од температуре и интензитета сунчевог зрачења. За разлику од поменутих радова, код реализованог решења подешавање изазног напона претварача на који је повезан ФН систем дефинише се преко референте вредности напона који се добија фази одлучивањем на основу четири улазне величине. Фази правила, реализованог хибридног система напајања, су дефинисана на основу вредности снаге расположивих извора енергије и стања напуњености батерије.

Даља истраживања биће усмерена на коришћење извора напајања као што су гориве ћелије или геотермална енергија као и паралелно повезивање више од два различита извора енергије. Након тестирања прототипа и реализације нулте серије хибридни систем ће се употребити на неколико удаљених локација за напајање телекомуникационих система.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>
- [2] <https://www.aers.rs/> (Агенција за енергетику Републике Србије)
- [3] Carrasco JM, Franquelo LG, Bialasiewicz JT, Galvan E, PortilloGuisado RC, Prats MAM, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey. IEEE Trans Indus Electron 2006;53(4):1002–16.
- [4] Denholm P, Kulcinski G. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems. Energy Convers Manage 2004;45(13–14):2153–72.
- [5] Kaldellis J. An integrated model for performance simulation of hybrid wind/diesel systems. Energy 2007;32:1544–64.
- [6] Kaiser R. Optimized battery-management system to improve storage lifetime in renewable energy systems. J Power Syst 2007;168:58–65.
- [7] Ahmed Nabil A, Miyatake Masafumi, Al-Othman AK. Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/ wind turbine and fuel cell systems. Energy Convers Manage 2008;49(10):2711–9.
- [8] R.L. Jaffe, W. Taylor, The Physics of Energy, Part I, Ch-1. Introduction, Cambridge University Press, 2018, pp 5-11.
- [9] Donald T. Swift-Hook, The case for renewables apart from global warming, Renewable Energy Volume 49, January 2013, Pages 147-150
- [10] Chanchal Loha, Malay K. Karmakar, Himadri Chattopadhyay, Gautam Majumdar, Renewable Biomass: A Candidate for Mitigating Global Warming, Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, Volume 3, 2020, Pages 715-727
- [11] Florian Keller, Roh Pin Lee, Bernd Meyer, Life cycle assessment of global warming potential, resource depletion and acidification potential of fossil, renewable and secondary feedstock for olefin production in Germany, Journal of Cleaner Production, Volume 250, 20 March 2020, 119484
- [12] P. Breeze, Power Generation Technologies, 2nd. edition, Ch.1. An introduction to Electricity generation, Elsevier-Newnes, 2014, pp.1-10
- [13] B. Sorensen, Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage, Ch.2 Basic principles of energy conversion, Academic Press, 2007, pp.3-32
- [14] Electricity from Renewable Resources: Status, Prospects, and Impediments Chapter: 3 Renewable Electricity Generation Technologies, Academic Press (2010), pp. 67-85.
- [15] Renewables 2019 (REN 21), Global Status Report.
- [16] Omar A. Al-Shahri, Firas B. Ismail, M. A. Hannan, M.S. Hossain Lipu, Ali Q. Al-Shetwi, R. A. Begum, Nizar F.O. Al-Muhsen, Ebrahim Soujeri, Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review, Journal of Cleaner Production, Volume 284, 15 February 2021, 125465.

-
- [17] <https://globalsolaratlas.info/map>
- [18] K. Ranabhart, R. Patrikeev, A.A. Revina, K. Andrianov, V. Lapshinky, E. Sofronova, An introduction to solar cell technology, Journal of Applied Engineering Science 405, Vol.14 (4), 2016, pp.481-491.
- [19] M. Tao, Terawatt Solar Photovoltaics, Roadblocks and Opportunities, 112 Pages, Springer-Verlag London, 2014.
- [20] Lin Huang Lianhua Deng Angui Lia Ran Gaoa Linhua Zhang Wenjun Lei, Analytical model for solar radiation transmitting the curved transparent surface of solar greenhouse, Journal of Building Engineering, Volume 32, November 2020, 101785.
- [21] W. Tong, ch1. Fundamentals of wind Energy, WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 2010, pp.1-20 (www.witpress.com, ISSN 1755-8336 (on-line)).
- [22] P. Breeze, Hydropower, 1st. edition, Chapter 33 - Dams and Barrages, 2018, pp.23-33
- [23] Hydropower Status Report, Global data, trends and insights from the International Hydropower Association, Online version, 11.06.2021.
- [24] Ercan İzgi, Ahmet Öztöpal, Bihter Yerli, Mustafa Kemal, Kaymak Ahmet, Duran Şahin, Short–mid-term solar power prediction by using artificial neural networks, Solar Energy, Volume 86, Issue 2, February 2012, Pages 725-733.
- [25] Божо Илић, Енергија и енергетска ефикасност, Висока техничка школа струковних студија, Нови Сад, 2019.
- [26] E.L.V. Eriksson, E. MacA. Gray, Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems – A critical review, Applied Energy, Volume 202, 15 September 2017, Pages 348-364
- [27] Farhan Mumtaz, Nor Zaihar Yahaya, Sheikh Tanzim Meraj, Balbir Singh, Ramani Kannan, Oladimeji Ibrahim, Review on non-isolated DC-DC converters and their control techniques for renewable energy applications, Ain Shams Engineering Journal, Available online 14 May 2021.
- [28] Samir Abdelmalek, Ali Dali, Azzeddine Bakdi, Maamar Bettayeb, Design and experimental implementation of a new robust observer-based nonlinear controller for DC-DC buck converters, Energy, Volume 213, 15 December 2020.
- [29] Hafsa Abouadane, Abderrahim Fakkar, Youssef Elkouari, David Ouoba, Performance of a new MPPT method for Photovoltaic systems under dynamic solar irradiation profiles, Energy Procedia, 21-24 August 2017, Cardiff, UK, Energy Procedia, Volume 142, December 2017, Pages 538-544.
- [30] B. Blanuša, Ž. Ivanović, B. Dokić, High Efficiency Photovoltaic System with Fuzzy Logic Controller, Electronics, vol. 21, no. 2, december 2017.
-

-
- [31] Ardjal A, Merabet A, Bettayeb M, Mansouri R, Labib L. Design and implementation of a fractional nonlinear synergetic controller for generator and grid converters of wind energy conversion system. *Energy* 2019; 186: 115861.
- [32] Al-Khori K, Bicer Y, Koç M. Integration of solid oxide fuel cells into oil and gas operations: needs, opportunities, and challenges. *J Cleaner Prod* 2020;245.
- [33] Mohd Alam, Kuldeep Kumara, Saket Verma, Viresh Dutta, Renewable sources based DC microgrid using hydrogen energy storage: Modelling and experimental analysis, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 42, December 2020.
- [34] Ahmed A. Kamel, Hegazy Rezk, Mohammad Ali Abdelkareem, Enhancing the operation of fuel cell-photovoltaic-battery-supercapacitor renewable system through a hybrid energy management strategy, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 8, 29 January 2021, Pages 6061-6075.
- [35] Ersan Kabalci, Design and analysis of a hybrid renewable energy plant with solar and wind power, *Energy Conversion and Management*, Volume 72, August 2013, Pages 51-59
- [36] M. Talaat, Farahat MA, Elkholy MH. Renewable power integration: Experimental and simulation study to investigate the ability of integrating wave, solar and wind energies. *Energy* 2019; 170: 668–682
- [37] M. Talaat, A. Elgarhy, M.H. Elkholy, M.A. Farahat, Integration of fuel cells into an off-grid hybrid system using wave and solar energy, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 130, September 2021, 106939
- [38] Lanre Olatomiwa, Saad Mekhilef, M.S.Ismail, M.Moghavvemi, Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 62, September 2016, Pages 821-835.
- [39] Song Z, Hou J, Hofmann H, Li J, Ouyang M. Sliding-mode and Lyapunov function-based control for battery/supercapacitor hybrid energy storage system used in electric vehicles. *Energy* 2017;122:601e12.
- [40] S. Saravanan, S. Thangavel, Instantaneous reference current scheme based power management system for a solar/wind/fuel cell fed hybrid power supply, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 55, February 2014, Pages 155-170.
- [41] Samir M. Dawoud, Developing different hybrid renewable sources of residential loads as a reliable method to realize energy sustainability, *Alexandria Engineering Journal*, Pages 2435–2445, 2021 година.
- [42] Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island, *Applied Energy*, Volume 121, Pages 149-158, 2014.
- [43] Dragana Petrović, Miroslav Lazić, Bojana Jovanović Lazić, Branko Blanuša, Stanko Aleksić, Hybrid Power Supply System with Fuzzy Logic Controller: Power Control Algorithm, Main Properties, and Applications, in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 10, NO. 4, July 2022 str. 923-931
-

-
- [44] Mousa, H.H.H., Youssef, AR. & Mohamed, E.E.M. Modified P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of five-phase PMSG based wind generation system. SN Appl. Sci. 1, 838 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0878-5>.
- [45] Ramji Tiwari, N Ramesh Babu, Fuzzy Logic Based MPPT for Permanent Magnet Synchronous Generator in wind Energy Conversion System, IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 1, 2016, Pages 462-467.
- [46] Dekali Zouheyr, Baghli Lotfi, Boumediene Abdelmadjid, Improved hardware implementation of a TSR based MPPT algorithm for a low cost connected wind turbine emulator under unbalanced wind speeds, Energy, Volume 232, 1 October 2021, 121039.
- [47] Miroslav Lazić, Dragan Stajić, Dragana Titelac: Primena mikrokontrolera za podešavanje izlaznih veličina ispravljačkog postrojenja, ISBN 978-99938-624-2-8, Infoteh Jahorina 2006. Vol. 5, Ref. E-IV-4, p. 453-457
- [48] E. H. Mamdani. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. IEE Proceeding, 121(12): 1585–1588.
- [49] Chonghua Wang, A Study of Membership Functions on Mamdani-Type Fuzzy Inference System for Industrial Decision-Making, 2015. Theses and Dissertations, Lehigh University.
- [50] Jassbi, J.J.; Serra, P.J.A.; Ribeiro, R.A.; Donati, A.; A Comparison of Mamdani and Sugeno Inference Systems for a space Fault Detection Application, Automation Congress, 2006. WAC '06. World. Issue Date: 24-26 July, On page(s): 1 – 8,2006.
- [51] Smail Chtita, Aziz Derouich, Abdelaziz El Ghzizal, Saad Motahhir, An improved control strategy for charging solar batteries in off-grid photovoltaic systems, Solar Energy 220 (2021) 927–941.
- [52] Villalva M.G., Gazoli J.R., Ruppert E.F, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, IEEE Trans. Power Electron., 2009, 25, (5), pp. 1198–1208.
- [53] Villalva, M. G., T. G. De Siqueira, and E. Ruppert, Voltage regulation of photovoltaic arrays: small-signal analysis and control design, IET Power Electronics 3.6 (2010): 869-880
- [54] Aleksandar Menićanin, Analiza karakteristika EMI potiskivača u vesokofrekventnom opsegu u balansiranom režimu rada, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, doktorska disertacija, 2010.
- [55] Miroslav Lazić, Dragana Petrović, Zoran Cvejić, Milan Pajnić, Elektromagnetna kompatibilnost prekidačkog izvora napajanja, 60. konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku Etran 2016, Zlatibor, 13. do 16. juna 2016. godine, ISBN 978-86-7466-618-0, str. EL1.3.1-4.

-
- [56] D. Petrović, M. Lazić, O. Aleksić, M. V. Nikolić, V. Ibrahimović, M. Pajnić, Mn-Zn ferrite line EMI suppressor for power switching noise in the impulse/high current bias regime, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk J Elec Eng & Comp Sci (2018) 26: 2426 – 2436, doi:10.3906/elk-1710-52
- [57] N. Sivaramakrishna and C. K. R. Reddy, “Hybrid power generation through combined solar – wind power and modified solar panel,” International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), vol. 4, no. 5, pp. 1414-1417, May 2013.

БИОГРАФИЈА

Драгана Петровић, рођена Тителац, дипломирала је 2003. на Факултету техничких наука у Новом Саду, Република Србија, на усмерењу за телекомуникације. Магистарски рад одбранила је 2011. године на истом факултету, на смеру за електронику. Од 2004. до 2019. године ради у предузећу ИРИТЕЛ а.д. БЕОГРАД. као старији сарадник сектора енергетске електронике, на пословима испитивања, пројектовања, продаји и писању атестне и техничке документације система за напајање. Од 2019. године је руководилац Сектора енергетске електронике у Ирителу. До сада је објавила више од 50 радова на домаћим и међународним конференцијама и часописима и активно учествовала у развоју 16 техничких решења.

Истакнути радиви и техничка решења:

M23

1. **D. Petrović**, M. Lazić, The remote control of power supplies – experiens of exploatation, Serbian journal of electrical engineering, Volume 9, No. 1, February 2012, 95-105, ISSN 1451-4869, UDK:621.311.68-52, DOI:10.2298/SJEE1201095P
2. **D. Petrović**, M. Lazić, O. Aleksić, M. V. Nikolić, V. Ibrahimović, M. Pajnić, Mn-Zn ferrite line EMI suppressor for power switching noise in the impulse/high current bias regime, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk J Elec Eng & Comp Sci (2018) 26: 2426 – 2436, doi:10.3906/elk-1710-52
3. **D. Petrović**, M. Lazić, B. Jovanović Lazić, B. Blanuša, S. Aleksić, Hybrid Power Supply System with Fuzzy Logic Controller: Power Control Algorithm, Main Properties, and Applications, in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, doi:10.35833/MPCE.2020.000069, 05 April 2021, Pages: 1 - 9.

M31, M32

1. M. Lazić, **D. Petrović**, M. Skender, S. Sovilj Nikić, The use of microcontrollers in modern solutions of power electronics, Indel 2014, 6-8. November 2014, Banja Luka, Republika Srpska (rad po pozivu) st.52-60
2. M. Lazić, **D. Petrović**, Z. Cvejić, B. Jovanović, Optimizing use of the alternative energy sources - DC distribution, ISBN 978-86-80509-70-9, 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2014, Vrnjačka Banja, Serbia, June 2 – 5, 2014. Invited paper. P.p. ELI1.1.1-6 (rad po pozivu)

M81

1. M. Lazić, M. Skender, **D. Petrović**, Z. Cvejić, B. Jovanović, Programabilni serijski konvertor za povezivanje alternativnih izvora – PSK1000, Institut za telekomunikacije i elektroniku Iritel a.d. Beograd, Srbija, Novi proizvod uveden u proizvodnju mart 2015.
2. M. Lazić, M. Skender, **D. Petrović**, Z. Cvejić, B. Jovanović, Sistem za kontrolu akumulatorskih baterija - SKB, Institut za telekomunikacije i elektroniku Iritel a.d. Beograd, Srbija, Novi proizvod uveden u proizvodnju mart 2015.
3. M. Lazić, **D. Petrović**, Z. Cvejić, B. Jovanović, M. Todorović, M. Jevtić, Uređaj za daljinski nadzor i upravljanje uređajima energetske elektronike – DNU4K, Institut za telekomunikacije i elektroniku Iritel a.d. Beograd, Srbija, Novi proizvod uveden u proizvodnju april 2015.
4. M. Lazić, **D. Petrović**, Z. Cvejić, B. Jovanović, M. Todorović, M. Jevtić, Ispravljački modul – IM500, Institut za telekomunikacije i elektroniku Iritel a.d. Beograd, Srbija, Novi proizvod uveden u proizvodnju april 2015.

Прилози

Изјава 1

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

**Изјављујем
да је докторска дисертација**

Наслов рада Нови приступ повећању енергетске ефикасности система напајања

Наслов рада на енглеском језику The new approach to increasing the energy efficiency of power supply

- ☐ резултат сопственог истраживачког рада,
- ☐ да докторска дисертација, у цјелини или у дијеловима, није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- ☐ да су резултати коректно наведени и
- ☐ да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци, 16.08.2022.

Потпис докторанта

Драгана Петровић

Изјава 2**Изјава којом се овлашћује Универзитет у Бањој Луци
да докторску дисертацију учини јавно доступном**

Овлашћујем Универзитет у Бањој Луци да моју докторску дисертацију под насловом

Нови приступ повећању енергетске ефикасности система напајања

која је моје ауторско дјело, учини јавно доступном.

Докторску дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

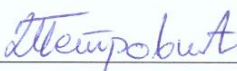
Моју докторску дисертацију похрањену у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
- ☒ 6. Ауторство – дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Бањој Луци, 16.08.2022.

Потпис докторанта



Изјава 3**Изјава о идентичности штампане и електронске верзије
докторске дисертације**

Име и презиме аутора	<u>Драгана Петровић</u>
Наслов рада	<u>Нови приступ повећању енергетске ефикасности система напајања</u>
Ментор	<u>Проф. др Бранко Блануша</u>

Изјављујем да је штампана верзија моје докторске дисертације идентична електронској верзији коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци, 16.08.2022.

Потпис докторанта

Драгана Петровић