

**UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO**

Valentin Ažbe

**ENOSMERNNA PORABNIŠKA OMREŽJA
Z RAZPRŠENO PROIZVODNJO IZ OBNOVLJIVIH VIROV**

MAGISTRSKO DELO

Ljubljana, 2003

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Valentin Ažbe

ENOSMERNNA PORABNIŠKA OMREŽJA
Z RAZPRŠENO PROIZVODNJO IZ OBNOVLJIVIH VIROV

MAGISTRSKO DELO

Mentor: prof. dr. Rafael Mihalič

Somentor: prof. dr. Dušan Povh

Ljubljana, 2003

ZAHVALA

Magistrsko delo je rezultat mojega podiplomskega študija na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, pod mentorstvom prof. dr. Rafaela Mihaliča in somentorstvom prof. dr. Dušana Povha.

Na prvem mestu se zahvaljujem prof. dr. Rafaelu Mihaliču za mentorstvo ter za vsestransko pomoč in podporo v času mojega podiplomskega študija.

Prav tako se zahvaljujem prof. dr. Dušanu Povhu za somentorstvo ter za pomoč in dragocene nasvete pri izdelavi magistrskega dela.

Zahvaljujem se svoji družini – ženi Tončki in hčerki Klari – za potrpežljivost in veliko podporo pri mojem študiju. Obenem se ženi Tončki zahvaljujem za jezikovni pregled besedila.

Zahvaljujem se tudi Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport za financiranje, ki sem ga bil v tem času deležen kot mladi raziskovalec.

Valentin Ažbe

Ljubljana, maj 2003

KAZALO

SEZNAM UPORABLJENIH OKRAJŠAV IN SIMBOLOV	1
POVZETEK	3
ABSTRACT	4
UVOD	5
1. RAZPRŠENA PROIZVODNJA	7
1.1 RAZPRŠENA IN PORAZDELJENA PROIZVODNJA	7
1.2 PREDNOSTI IN SLABOSTI RAZPRŠENE PROIZVODNJE	7
1.3 SOPROIZVODNJA (KOGENERACIJA) TOPLOTE IN ELEKTRIČNE ENERGIJE	9
2. ENOSMERNO IZOLIRANO OMREŽJE	10
2.1 PRIMER IZOLIRANEGA OMREŽJA	10
2.2 MOŽNE VARIANTE OBRATOVANJA IZOLIRANEGA OMREŽJA	10
2.3 ZAKAJ ENOSMERNO OMREŽJE ?	12
2.4 REGULACIJA NAPETOSTI IN PRETOKOV MOČI	13
2.4.1 PRIKLOP AKUMULATORJA NA OMREŽJE	13
2.4.2 PRIKLOP VIROV NA OMREŽJE	14
2.4.3 PRIKLOP PORABNIKOV NA OMREŽJE	14
2.5 PRIMERI NEKATERIH ZNAČILNIH STANJ OMREŽJA	14
2.6 IZBIRA NAZIVNE NAPETOSTI	15
2.6.1 VPLIV NAPETOSTI NA PRESEK VODNIKOV	15
2.6.2 VPLIV NAPETOSTI NA IZOLACIJO IN VARNOST OBRATOVANJA	16
2.6.3 VPLIV NAPETOSTI NA KOMPATIBILNOST Z OBSTOJEČIMI ELEKTRIČNIMI NAPRAVAMI	16
2.6.4 IZBIRA NAZIVNE NAPETOSTI ZA OBRAVNAVANI MODEL OMREŽJA	16
2.7 PRAVILNIKI IN STANDARDI	16
3. DEFINICIJA PORABE	19
3.1 SPLOŠNO O PORABNIKIH	19
3.2 TIPI PORABNIKOV ZA STANOVANJSKO HIŠO	20

3.3	FAKTOR ISTOČASNOSTI	22
3.4	KARAKTERISTIKE POSAMEZNIH PORABNIKOV	23
3.4.1	RAZSVETLJAVA	23
3.4.2	HLADILNIK IN ZAMRZOVALNA SKRINJA	23
3.4.3	RAČUNALNIK, TELEVIZOR, VIDEO, AUDIO IN OSTALE ELEKTRONSKE NAPRAVE	24
3.4.4	PRALNI STROJ	24
3.4.5	POMIVALNI STROJ	24
3.4.6	GOSPODINJSKI APARATI	25
3.5	U/I KARAKTERISTIKE PORABNIKOV	25
4. DEFINICIJA VIROV		26
4.1	KRAJEVNI POLAŽAJ IN MOČ VIROV	26
4.2	PRIKLJUČITEV VIROV NA OMREŽJE	26
4.2.1	PRINCIP DELOVANJA DC/DC PRETVORNIKOV	26
4.2.2	REGULACIJA DC/DC PRETVORNIKOV	28
4.2.3	IZVEDBA PULZNO-ŠIRINSKE MODULACIJE	29
4.3	SONČNE CELICE	31
4.3.1	SPLOŠNO O SONČNIH CELICAH	31
4.3.2	ELEKTRIČNI PARAMETRI SONČNIH CELIC	31
4.3.3	REGULACIJA SONČNIH CELIC	32
4.3.4	MODEL SONČNE CELICE IN DC/DC PRETVORNIKA Z REGULACIJO	34
4.4	VETERNE TURBINE	37
4.4.1	SPLOŠNO O VETERNIH TURBINAH	37
4.4.2	ELEKTRIČNI PARAMETRI VETERNIH TURBIN	38
4.4.3	REGULACIJA VETERNIH TURBIN	39
4.4.4	MODEL VETERNE TURBINE IN DC/DC PRETVORNIKA Z REGULACIJO	40
4.5	GORIVNE CELICE	44
4.5.1	SPLOŠNO O GORIVNIH CELICAH	44
4.5.2	VRSTE GORIVNIH CELIC	44
4.5.3	ELEKTRIČNI PARAMETRI GORIVNIH CELIC	45
4.5.4	REGULACIJA GORIVNIH CELIC	46
4.5.5	MODEL GORIVNIH CELIC IN DC/DC PRETVORNIKA Z REGULACIJO	47
4.6	MIKRO-HIDROELEKTRARNE	50
5. AKUMULACIJA ENERGIJE		51
5.1	AKUMULATORJI	51
5.2	ELEKTRIČNI PARAMETRI SVINČEVIH AKUMULATORJEV	51

5.3	REGULACIJA AKUMULATORJEV	53
5.4	MODEL AKUMULATORJA	55
6.	POVEZAVA VIROV IN PORABE	59
6.1	ELEMENTI POVEZOVALNIH VODOV	59
6.1.1	VODNIKI	59
6.1.2	ODKLOPNIKI, VAROVALKE	60
6.2	HIŠNA INŠTALACIJA	60
7.	POENOSTAVLJENI MODEL OMREŽJA	61
7.1	MODEL POENOSTAVLJENEGA OMREŽJA	61
7.2	REZULTATI DIGITALNE SIMULACIJE POENOSTAVLJENEGA MODELA	62
8.	SIMULACIJA OBRATOVANJA DETAJLNEGA MODELA OMREŽJA	66
8.1	ZAGON OBREMENJENEGA OMREŽJA	67
8.2	ZAGON NEOBREMENJENEGA OMREŽJA	70
8.3	KRATEK STIK NA VODU Z VKLJUČENO NADTOKOVNO ZAŠČITO	71
8.4	KRATEK STIK NA VODU Z VKLJUČENO PODNAPETOSTNO IN PRENAPETOSTNO ZAŠČITO	75
8.5	KRATEK STIK NA VODU Z VKLJUČENO VZDOLŽNO DIFERENČNO ZAŠČITO	77
8.6	OBRATOVANJE OMREŽJA OB IZPADU AKUMULATORJA	79
	ZAKLJUČEK	81
	LITERATURA	83

SEZNAM UPORABLJENIH OKRAJŠAV IN SIMBOLOV

1. Seznam uporabljenih okrajšav

AC	izmenični (angl. alternating current)
AFC	alkalne gorivne celice (angl. alkaline fuel cell)
DC	enosmerni (angl. direct current)
IGBT	insulated gate bipolar transistor
MCFC	gorivne celice s staljenim karbonatom (angl. molten carbonate fuel cell)
MPPT	sledenje točki največje moči (angl. maximum power point tracking)
PAFC	gorivne celice s fosforjevo kislino (angl. phosphoric acid fuel cell)
PEMFC	gorivne celice z membrano, ki prepušča protone (angl. proton exchange membrane fuel cell)
PFM	pulzno-frekvenčna modulacija (angl. pulse-frequency modulation)
PWM	pulzno-širinska modulacija (angl. pulse-width modulation)
SOFC	gorivne celice s keramičnim elektrolitom (angl. solid oxide fuel cell)

2. Uporabljeni simboli

c_p	faktor moči rotorja veterne turbine
c_T	faktor navora rotorja veterne turbine
C/10	tok, pri katerem se akumulator izprazni do dovoljene meje v desetih urah
I	razdalja med virom in porabnikom
I_{IGBT}	tok skozi IGBT
I_{izhod}	izhodni tok DC/DC pretvornika
I_{vhod}	vhodni tok DC/DC pretvornika
$I_{razlika}$	razlika med želenim in dejanskim tokom regulacijskega vezja v DC/DC pretvorniku
$I_{accu out}$	izhodni tok akumulatorja,
$I_{sc out}$	izhodni tok DC/DC pretvornika sončnih celic,
$I_{vet out}$	izhodni tok DC/DC pretvornika veterne turbine,
$I_{gc out}$	izhodni tok DC/DC pretvornika gorivnih celic,
$I_{accu in}$	vhodni tok DC/DC pretvornika pri polnjenju akumulatorja,
I_{sc}	tok sončnih celic – vhodni tok DC/DC pretvornika,
I_{gc}	tok gorivnih celic – vhodni tok DC/DC pretvornika,
I_{vet}	izhodni tok usmernika veterne turbine,

$I_{accu\ sc}$	tok voda med akumulatorjem in sončnimi celicami s strani akumulatorja,
$I_{sc\ accu}$	tok voda med akumulatorjem in sončnimi celicami s strani sončnih celic
$I_{accu\ vet}$	tok voda med akumulatorjem in veterno turbino s strani akumulatorja,
$I_{vet\ accu}$	tok voda med akumulatorjem veterno turbino s strani veterne turbine,
$I_{sc\ vet}$	tok voda med sončnimi celicami in veterno turbino s strani sončnih celic,
$I_{sc\ vet}$	tok voda med sončnimi celicami in veterno turbino s strani veterne turbine.
λ	hitrostno število veterne turbine (angl. tip speed ratio)
on/off	prožilni impulz IGBT
ρ	specifična upornost vodnika
S	najmanjši še ustrezen presek vodnika
U_n	nazivna napetost omrežja
U_{izhod}	izhodna napetost DC/DC pretvornika
U_L	napetost za tuljavo DC/DC pretvornika
U_{vhod}	vhodna napetost DC/DC pretvornika
$U_{razlika}$	razlika med želeno in dejansko napetostjo regulacijskega vezja v DC/DC pretvorniku
$U_{oscilator}$	napetost oscilatorja v DC/DC pretvorniku
$U_{accu\ omr}$	napetost omrežja v točki priklopa akumulatorja,
$U_{sc\ omr}$	napetost omrežja v točki priklopa sončnih celic,
$U_{gc\ omr}$	napetost omrežja v točki priklopa gorivnih celic,
$U_{vet\ omr}$	napetost omrežja v točki priklopa veterne turbine,
U_{accu}	napetost na sponkah akumulatorja,
U_{sc}	napetost na sponkah sončnih celic,
U_{gc}	napetost na sponkah gorivnih celic,
U_{vet}	izhodna napetost usmernika veterne turbine,
x	dovoljen procentualni padec napetosti na vodu

POVZETEK

Magistrsko delo obravnava enosmerno nizkonapetostno porabniško omrežje, ki obratuje otočno. Porabniki se napajajo iz različnih virov, ki so na omrežje priključeni v točkah porabe. To pomeni, da se moč po vodih v omrežju ne pretaka le v eno smer ampak v obe smeri, glede na trenutno proizvodnjo in porabo. S tem delo sega na področje razpršene proizvodnje električne energije. Predvidena je proizvodnja električne energije iz obnovljivih virov. V omrežje smo vključili tudi akumulacijo električne energije v obliki svinčevega akumulatorja, ki izravnava razliko med proizvodnjo in porabo. V nasprotju z večino obstoječih nizkonapetostnih omrežji, ki obratujejo pri izmenični napetosti 230 V in 50 Hz oz. 110 V in 60 Hz, smo predpostavili obratovanje omrežja z enosmerno napetostjo.

Proučili smo tehnične možnosti obratovanja takega omrežja, načine priključitve posameznih naprav na omrežje in principe regulacije napetosti in pretokov moči.

Za izgradnjo enosmernega izoliranega omrežja s proizvodnjo iz obnovljivih virov smo proučili posamezne standardne porabnike glede možnosti priklopa na enosmerno napetost. Kot se je izkazalo, nekatere porabnike lahko na enosmerno napetost priključimo neposredno, nekateri potrebujejo manjšo ali večjo stopnjo prilagoditve, nekateri pa za priklop potrebujejo razsmernik.

Nadalje smo za priklop na enosmerno omrežje proučili posamezne vire, to je sončne celice, veterne turbine in gorivne celice. Ugotovili smo, da za priklop potrebujemo DC/DC pretvornike, ki skrbijo za optimalno delovanje virov in za pretok moči v omrežje. Prav tako smo proučili akumulator, ki poleg shranjevanja električne energije opavlja tudi funkcijo vzdrževanja stabilne napetosti omrežja.

Za proučevanje razmer v obravnavanem omrežju smo izdelali model omrežja za digitalno simulacijo s programom PS CAD / EMTDC. Rezultati digitalne simulacije so pokazali pravilnost predpostavke, da akumulator skupaj z DC/DC pretvornikom lahko zagotavlja stabilno napetost omrežja, DC/DC pretvorniki virov pa skrbijo za pretok moči v omrežje in za regulacijo optimalnega delovanja virov.

Glavna ugotovitev proučevanja je, da je obratovanje izoliranega enosmernega porabniškega omrežja, ki je napajano z razpršeno proizvodnjo iz obnovljivih virov, povsem možno. Pri tem so uporabljeni standardni elementi tako na strani proizvodnje kot na strani porabe. Centralna regulacija ter komunikacija med posameznimi enotami pri tem ni potrebna.

ABSTRACT

This thesis deals with DC low-voltage distribution networks that operate in 'island' mode. The consumers are supplied from different sources, which are connected to the network at the points of consumption. This means that the power does not flow in just one direction, but in both directions, according to the current levels of production and consumption. With this the thesis extends to the field of the dispersed generation of electrical energy, and the usage of renewable sources is foreseen. Energy storage is included in the network in the form of a lead-acid battery, which compensates for the difference between production and consumption. In contrast to the majority of existing low-voltage networks, which operate at 230 V and 50 Hz or at 110 V and 60 Hz, we anticipate a network that will operate with direct current.

We examined the technical possibilities of operating of such networks, the way of connecting particular devices to the network and the principles of voltage and power-flow control.

In order to design an isolated DC network with dispersed generation from renewable sources, we examined the possibility of connecting standard consumer devices to a DC network. We found that some devices can be connected to the DC network directly, while others need different levels of alteration and, in some cases, inverters.

In addition we examined a number of sources—i.e. solar cells, wind turbines and fuel cells—to see how we could connect them to the DC network. We found that we needed DC/DC converters to connect the sources to the network. DC/DC converters ensure the optimal operation of sources and proper power-flow to the network. Likewise we examined the battery, which besides functioning as an energy-storage device also provides a stable network voltage.

In order to examine the behavior of such networks, we constructed a model of the network for digital simulation with the computer program PS CAD / EMTDC. The results of the digital simulation confirmed our suppositions: that the battery, together with a DC/DC converter, can provide a stable network voltage, while DC/DC converters for connecting sources provide the proper power-flow to the network and ensure the optimal operation of the sources.

The main result of this thesis is that the operation of an isolated DC network with a dispersed generation is certainly possible using standard elements on the generation as well as on the consumption side of the network. Central regulation and communication between the individual units is not required.

UVOD

V magistrskem delu predstavljamo možnost obratovanja enosmernega izoliranega nizkonapetostnega omrežja, ki je napajano iz obnovljivih virov. Viri so na omrežje priključeni v različnih točkah, kjer se nahaja tudi poraba, torej gre za razpršeno proizvodnjo električne energije.

Glavni namen dela je raziskati tehnične možnosti obratovanja takega omrežja, ugotoviti načine priklopa posameznih virov, akumulacije in porabnikov na enosmerno omrežje ter prikazati osnovne principe regulacije napetosti in pretokov moči. Tako enosmerno omrežje lahko predstavlja tehnično in ekonomsko alternativo izmeničnemu omrežju.

V pričajučem delu je najprej predstavljena razpršena proizvodnja s svojimi prednostmi in slabostmi. Sledi predstavitev različnih možnosti obratovanja enosmernih izoliranih omrežji, kjer smo navedli tudi predpise in standarde, ki smo jih upoštevali pri izgradnji našega omrežja.

V naslednjem, tretjem poglavju so predstavljeni predvideni porabniki. Glede posameznih porabnikov nas je zanimala predvsem moč posameznega porabnika, časovni potek obratovanja posameznega porabnika ter istočasnost delovanja večih porabnikov. Glede na to, da je predmet magistrskega dela enosmerno omrežje, smo proučili tudi možnost priklopa posameznih porabnikov na enosmerno napetost.

Četrto poglavje predstavlja jedro magistrskega dela. Tu so predstavljeni obnovljivi viri električne energije ter njihov način priklopa na enosmerno omrežje. Najprej je predstavljen princip delovanja DC/DC pretvornikov ter pulzno-širinska modulacija. Sledi predstavitev posameznih virov, to je sončnih celic, veterne turbine in gorivnih celic. Za vsakega od virov smo podali:

- splošne lastnosti vira,
- električne parametre,
- predstavitev načina regulacije,
- model vira in DC/DC pretvornika skupaj z regulacijo in detajlnim pregledom poteka napetosti in tokov med regulacijo.

Peto poglavje predstavlja akumulacijo električne energije, ki jo predstavlja svinčev akumulator. Prav tako kot pri virih so najprej podane splošne lastnosti akumulatorja,

sledi opis električnih parametrov, predstavitev načina regulacije, na koncu pa je prikazan model akumulatorja in DC/DC pretvornika z detajlnim prikazom regulacije.

Sledi opis izbire vodnikov za prenosne vode in za hišno inštalacijo ter izbira zaščitnih naprav in stikal.

Sedmo poglavje prikazuje digitalno simulacijo obravnavanega omrežja za obratovanje v času enega dneva. V ta namen smo izdelali poenostavljeni model omrežja. Ti rezultati so ustrezni za proučevanje različnih stacionarnih stanj omrežja.

Osmo poglavje predstavlja digitalno simulacijo prehodnih pojavov. V ta namen smo izdelali podrobnejši model omrežja tako, kakor je opisano v četrtem poglavju. Kot rezultati digitalne simulacije so predstavljeni tokovi in napetosti virov, DC/DC pretvornikov in posameznih vodov v omrežju. Predstavljeni so prehodni pojavi ob zagonu obremenjenega in neobremenjenega omrežja, prehodni pojavi ob kratkem stiku na vodu z upoštevanjem delovanja nadtokovne, podnapetostne, prenapetostne ali vzdolžne diferenčne zaščite ter prehodni pojavi ob izpadu akumulatorja.

1. RAZPRŠENA PROIZVODNJA

1.1 RAZPRŠENA IN PORAZDELJENA PROIZVODNJA

Razpršena proizvodnja (angl. dispersed generation) pomeni proizvodnjo električne energije v bližini mesta porabe. Priključena je lahko na javno elektroenergetsko omrežje ali na izolirano omrežje. Razpršena proizvodnja se nanaša samo na manjše proizvodne enote moči od 1 do 250 kW, ki ponavadi napajajo posamezne stanovanjske enote ali manjša podjetja in obratujejo na napetosti do 1 kV. Proizvodne enote, značilne za razpršeno proizvodnjo, so veterne turbine, male in mikrohidroelektrarne, sončne celice, dieselski agregati ter gorivne celice.

Poleg razpršene proizvodnje je definirana tudi porazdeljena proizvodnja (angl. distributed generation). Ta se nanaša na proizvodnjo električne energije v poljubnih točkah omrežja in ni omejena samo na mesta porabe. Porazdeljena proizvodnja vključuje tudi večje proizvodne enote moči do 10.000 kW. Proizvodne enote so lahko prikjučene na nizkonapetostno ali srednjenapetostno omrežje, ki je lahko del javnega elektroenergetskega omrežja ali pa obratuje kot izolirano omrežje. V prejšnjem odstavku opisano razpršeno proizvodnjo tako lahko obravnavamo kot del porazdeljene proizvodnje, ki se nanaša na manjše moči in na mesta porabe [1].

1.2 PREDNOSTI IN SLABOSTI RAZPRŠENE PROIZVODNJE

Še vedno velja, da so večji generatorji bolj učinkoviti in da so skupni stroški proizvodnje za večje elektrarne glede na proizvedeno energijo manjši. Kljub temu pa ima razpršena proizvodnja določene prednosti, ki jih opisujemo v nadaljevanju [1].

Učinkovitost pretvorbe energije fosilnih goriv v električno znaša pri velikih termoelektrarnah od 28 do 35 %. V nasprotju s tem zanaša izkoristek gorivnih celic manjših moči in izkoristek nekaterih plinskih turbin, primernih za razpršeno proizvodnjo, približno 45 %. Pri tem je razlika predvsem v tem, da razpršena proizvodnja uporablja moderne in izpopolnjene proizvodne enote z visoko tehnologijo, medtem ko je tehnologija termoelektrarn v povprečju stara 20 let. Če pa primerjamo nove proizvodne enote enake tehnologije, je prednost še vedno na strani večjih enot.

Razlika med majhnimi in velikimi proizvodnimi enotami glede skupnih stroškov proizvodnje na proizvedeno energijo se je v preteklosti zmanjšala. Tako so bili sredi 20. stoletja stroški za 1 kWh električne energije, proizvedene z manjšimi

proizvodnimi enotami, okrog 60 % višji od stroškov večjih enot, ob koncu 20. stoletja pa je ta razlika znašala le še 30%.

Vprašamo se lahko, zakaj torej uporabljati razpršeno proizvodnjo, če ni cenejša in bolj učinkovita. Eden izmed odgovorov je v tem, da je razpršena proizvodnja locirana na mestu porabe, kar pomeni, da nimamo stroškov prenosa in razdeljevanja, ki v določenih primerih lahko predstavljajo velik strošek. Stroški prenosa in razdeljevanja so v zadnjih tridesetih letih opazno narasli, predvsem zaradi višjih stroškov dela ter zaradi občutno večjih zahtev glede varnosti, varstva okolja in estetike. Stroški razpršene proizvodnje pa so se v tem obdobju znižali.

Primerjava stroškov med razpršeno proizvodnjo in napajanjem iz javnega elektroenergetskega omrežja glede na zanesljivost obratovanja kaže, da so stroški razpršene generacije nižji pri zelo nizki ter pri zelo visoki zahtevani zanesljivosti. Tako ima razpršena proizvodnja prednost tam, kjer so pomembni čim nižji stroški proizvodnje ob hkratni nizki zahtevani zanesljivosti ter tam, kjer je zahtevana zelo visoka zanesljivost, ki je javno elektroenergetsko omrežje težko zagotovi.

Razpršena proizvodnja ima še nakaj prednosti, ki povečujejo njeno primernost za uporabo. Te lastnosti so:

- a) proizvodne enote so tovarniško izdelane, standardizirane in optimirane za določen način obratovanja,
- b) hitro in enostavno se jih glede na potrebe nadgrajuje z dodatnimi proizvodnimi enotami,
- c) vpliv na okolje – manjša onesnaženost zraka, manjši hrup in manj daljnovodov.

Naj omenimo še slabosti, ki jih ima razpršena proizvodnja. Te so predvsem:

- a) lastnik proizvodnih enot mora prevzeti skrbništvo nad delovanjem, kar je lahko dokaj zahtevna naloga,
- b) nekatere proizvodne enote potrebujejo gorivo – ponavadi zemeljski plin – katerega dostava ni vedno enostavna in poceni,
- c) tehnologija enot za razpršeno proizvodnjo v praksi še ni povsem preizkušena.

1.3 SOPROIZVODNJA (KOGENERACIJA) TOPLOTE IN ELEKTRIČNE ENERGIJE

Glavni del porebe energije v stanovanjskih hišah predstavlja ogrevanje prostorov in priprava tople vode. Enote za sproizvodnjo so v prvi vrsti namenjene za potrebe ogrevanja, poleg tega pa proizvajajo električno energijo. Enote za sproizvodnjo, ki so na trgu, so dieselski agregati in toplotni stroji na biomaso. V fazi testiranja so gorivne celice za sproizvodnjo in naj bi bile za komercialno uporabo kmalu na voljo. Razmerje med proizvedeno toploto in proizvedeno električno energijo je za dieselske sproizvodne enote od 2.5 pri potrebi po elektriki do 17 pri potrebi po toploti [2, 3], za gorivne celice naj bi to razmerje bilo okrog 1 [2, 33].

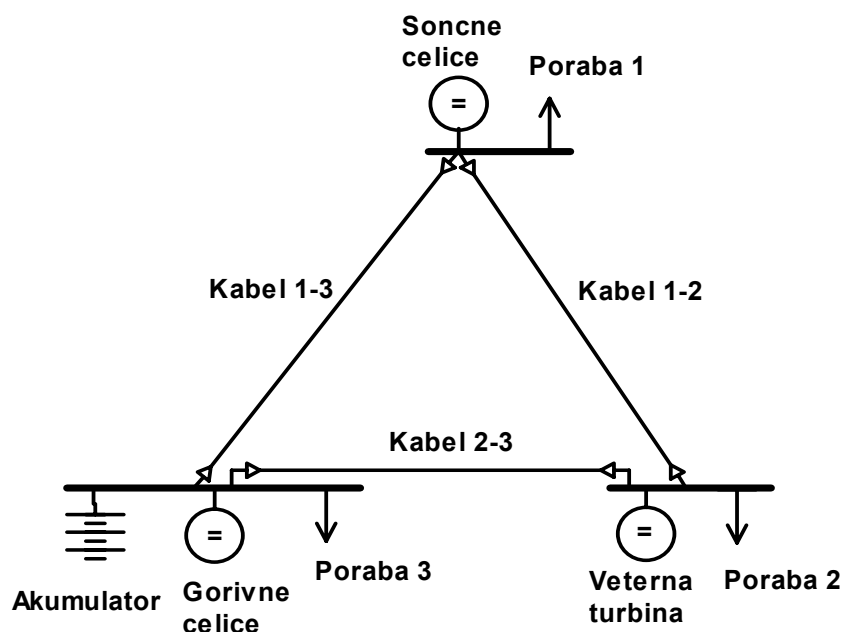
Tudi v poletnem času, ko se toplota porablja samo za pripravo tople vode – za kar povprečno gospodinjstvo porabi okrog 15 kWh energije na dan – je sproizvodnja električne energije lahko dovolj velika za pokrivanje porabe električne energije varčno usmerjene stanovanjske hiše, ki znaša okrog 7 kWh na dan.

2. ENOSMERNO IZOLIRANO OMREŽJE

2.1 PRIMER IZOLIRANEGA OMREŽJA

Proučevanje razmer v enosmernih izoliranih omrežjih smo izvedli na primeru omrežja, ki povezuje tri stanovanjske enote, med sabo oddaljene 500 m. Vsaka stanovanjska enota ima svoj vir električne energije; prva sončne celice moči 1 kW, druga veterno turbino moči 2.5 kW in tretja gorivne celice, ki poleg električne moči 4 kW lahko proizvaja tudi toploto za ogrevanje prostorov in vode. Za porabo vsake od stanovanjskih enot smo predvideli (s podrobnejšo analizo v nadaljevanju) 6.8 kWh na dan, največja možna moč pa naj znaša 2.3 kW. Ker se proizvodnja in poraba praktično nikoli ne ujemata, je predvidena akumulacija energije v obliki akumulatorja, ki je postavljen v eni izmed stanovanjskih enot.

Shemo vzorčnega omrežja prikazuje sl. 2.1 in bi lahko v naših razmerah predstavljala majhen odročen gorski zaselek, sicer pa zaselke v nerazvitih deželah, kjer se elektrifikacija šele začne in so vasi oddaljene od omrežja.



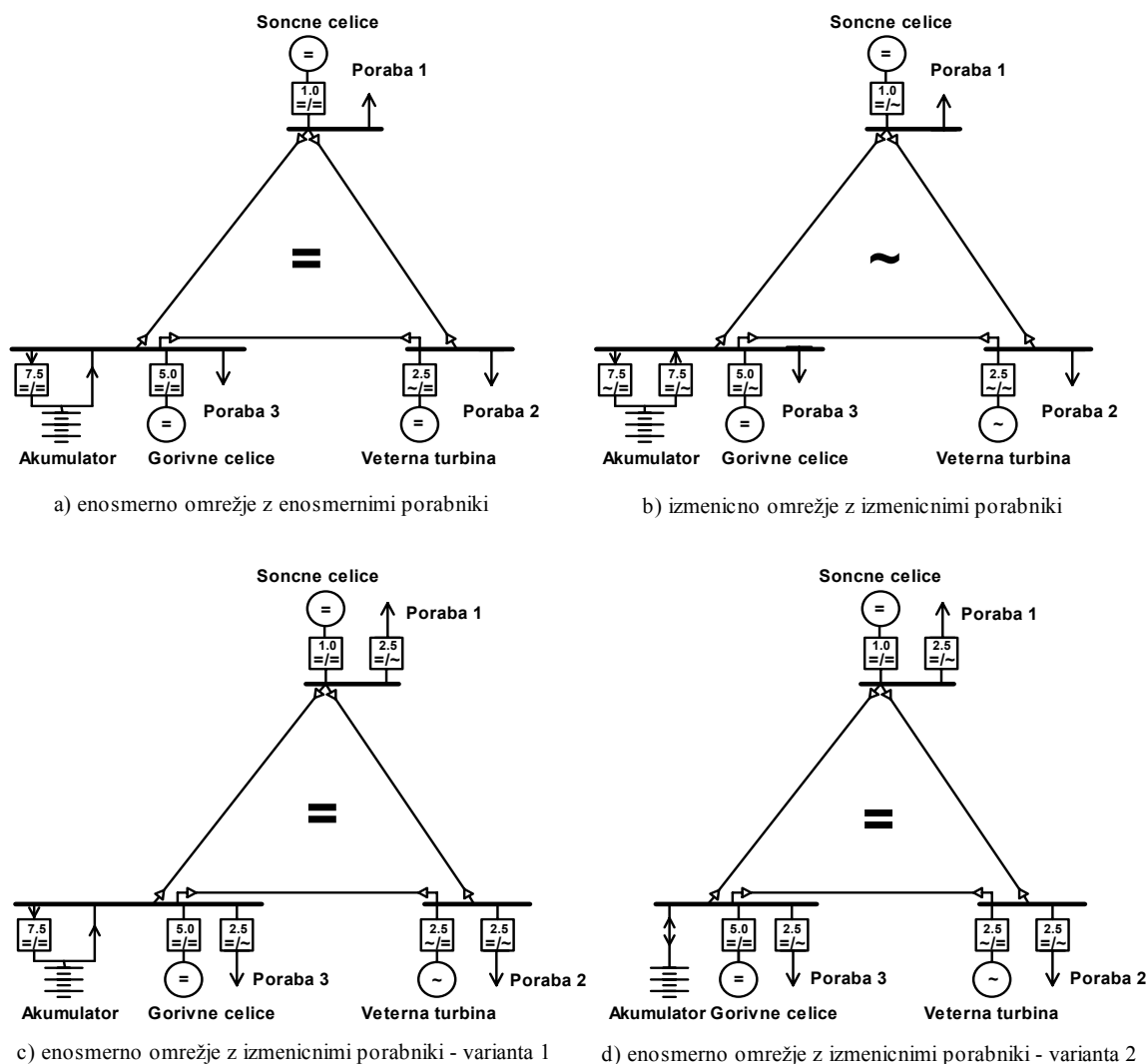
Sl. 2.1: Primer izoliranega omrežja

2.2 MOŽNE VARIANTE OBRATOVANJA IZOLIRANEGA OMREŽJA

Obratovanje izoliranega omrežja je možno na več načinov. V vsakem primeru pa ključno vlogo pri regulaciji igra močnostna elektronika v obliki različnih pretvornikov. Na sl. 2.2 so prikazani štiri načini priklopa električnih naprav na omrežje.

V primeru a gre za enosmerno omrežje z enosmernimi porabniki. Akumulator je pri napajanju omrežja priključen neposredno, pri polnjenju pa preko DC/DC pretvornikov. Viri so priključeni preko DC/DC ali AC/DC pretvornikov. Velikost napetosti v omrežju je odvisna od napetosti akumulatorja in padca na vodnikih. Slaba stran takega omrežja je ta, da morajo biti porabniki primerni za priključitev na enosmerno napetost. Vsota moči vseh pretvornikov znaša 16 kW.

V primeru b gre za izmenično omrežje, na katerega lahko izmenične porabnike neposredno priključimo. Akumulator je pri napajanju omrežja priključen preko DC/AC pretvornika in pri polnjenju preko AC/DC pretvornika. Viri so priključeni preko DC/AC ali AC/AC pretvornikov. Velikost napetosti v omrežju je odvisna od padca na vodnikih, na mestu priključitve akumulatorjev pa je lahko konstantna. Slaba stran takega omrežja je v večjem številu pretvornikov ter bolj zapleteni regulaciji. Vsota moči vseh pretvornikov znaša 23.5 kW.



Sl. 2.2: Različni načini obratovanja izoliranega omrežja

V primeru c gre za enosmerno omrežje, precej podobno primeru a), s to razliko, da je z DC/AC pretvorniki omogočena priključitev vseh standardnih izmeničnih porabnikov. Vsota moči vseh pretvornikov znaša 23.5 kW.

V primeru d gre za enosmerno omrežje, na katerega je akumulator priključen neposredno tako pri napajanju omrežja kot pri polnjenju. Napetost v takem omrežju je odvisna od napoljenosti akumulatorja in od tega, ali se le-ta prazni ali polni. Porabniki so na omrežje priključeni preko DC/AC pretvornikov. Slaba stran takega omrežja je precejšnje nihanje napetosti (okrog $\pm 25\%$ nazivne napetosti). Vsota moči vseh pretvornikov znaša 16 kW.

V pričujočem delu smo posamezne elemente omrežja proučili s stališča različnih prikljopov na omrežje. Za digitalno simulacijo omrežja smo izdelali model kot kombinacijo primerov a in c, kjer so porabniki po večini priključeni neposredno na enosmerno omrežje, za porabnike, ki se jih ne da priklopiti na enosmerno napetost, pa je uporabljen DC/AC pretvornik.

2.3 ZAKAJ ENOSMerno OMREŽJE ?

Električna energija, ki jo pridobivamo iz obnovljivih virov, je enosmerna ali pa izmenična s spremenljivo frekvenco. Prav tako je enosmerna električna energija, pridobljena iz gorivnih celic ter električna energija, ki jo shranjujemo v akumulator ali druge shranjevalnike električne energije. Izmenično elektroenergetsko omrežje, ki vsebuje prej omenjene elemente, potrebuje DC/AC pretvornike. V primeru, da je elektroenergetsko omrežje enosmerno, se lahko del teh pretvornikov opusti ali pa zamenja s cenejšimi DC/DC pretvorniki. Poleg tega je izgradnja enosmernih vodov cenejša od izmeničnih, cene močnostne elektronike so vse nižje, v enosmernih omrežjih pa je tudi regulacija napetosti lažja. Vse naštetu nas je privedlo do zaključka, da proučimo možnost izvedbe enosmernega omrežja.

V pričujočem magistrskem delu obravnavamo omrežje, ki predstavlja kombinacijo modelov a in c po sl. 2.2. To pomeni, da je obravnavano obratovanje enosmernega omrežja, na katerega se sončne celice in gorivne celice priključujejo preko DC/DC pretvornikov in veterna turbina preko AC/DC pretvornika. Akumulator je pri napajanju omrežja priključen neposredno, za polnjenje akumulatorja pa se uporabijo polnilci – DC/DC pretvorniki, ki paralelno polnijo posamezne celice akumulatorja. Bremena želimo v čim večji meri priključiti neposredno na omrežje. V ta namen smo proučili možnost posameznih električnih naprav za priključitev na enosmerno napetost. Če priključitev na enosmerno napetost ni možna, je potrebno uporabiti DC/AC pretvornik.

2.4 REGULACIJA NAPETOSTI IN PRETOKOV MOČI

V nasprotju z omrežjem izmenične napetosti, kjer se pretok moči regulira s faznim kotom, se pri enosmernih omrežjih pretok moči regulira z velikostjo napetosti v različnih točkah omrežja. Moč teče od točke z višjo napetostjo do točke z nižjo napetostjo. Tako imamo v različnih točkah omrežja različne napetosti. Predpisi za izmenično omrežje 400 V, 50 Hz predpisujejo, da mora biti obratovalna napetost v mejah $\pm 10\%$ nazivne napetosti. Podobno zahtevo bi v primeru neposrednega priklopa bremen na omrežje morala verjetno izpolnjevati tudi enosmerna razdelilna omrežja.

Osnovni princip regulacije je ta, da akumulator vzdržuje čimbolj konstantno napetost, viri pa preko DC/DC pretvornikov omogočajo pretok proizvedene moči v omrežje. Razlike napetosti med posameznimi točkami omrežja so odvisne od ohmske upornosti vodov in tokov med posameznimi točkami. Da dobimo najvišje in najnižje možne obratovalne napetosti omrežja, moramo nihanju napetosti omrežja v točki priklopa akumulatorja prišteti še padec napetosti na vodnikih.

2.4.1 Priklop akumulatorja na omrežje

Akumulator smo priključili na omrežje tako, da je pri napajanju omrežja priključen neposredno, pri polnjenju pa preko DC/DC pretvornikov. Tako torej napetost omrežja v točki priklopa akumulatorja niha za toliko, kolikor znaša razlika med napetostjo povsem napolnjenega in hkrati neobremenjenega akumulatorja ter napetostjo še dopustno izpraznjenega akumulatorja pri največjem možnem toku. Ta razlika napetosti praznenja za svinčev akumulator znaša 10% oz. $\pm 5\%$. Pri polnjenju akumulatorja pa DC/DC pretvornik polni akumulator s tako močjo, da vzdržuje konstantno napetost omrežja. Če torej hočemo doseči, da bo nihanje napetosti v celotnem omrežju pod $\pm 10\%$, znaša največji dovoljeni padec napetosti na vodih $\pm 5\%$.

Drug način priklopa akumulatorja je ta, da bi tako za napajanje omrežja kot za polnjenje akumulatorja uporabili DC/DC pretvornik, ki bi v točki priklopa akumulatorja vzdrževal konstantno napetost omrežja. To pomeni, da ta pretvornik polni ali prazni akumulator s tako močjo, da je napetost pretvornika na strani omrežja konstantna. S tem se največji dovoljeni padec napetosti na vodih poveča na $\pm 10\%$, kar pomeni tanjše in s tem cenejše vodnike.

Tretji način priklopa akumulatorja pa je stalni neposredni priklop akumulatorja brez DC/DC pretvornikov. Ker napetost akumulatorja pri polnjenju naraste, znaša nihanje napetosti na akumulatorju in s tem napetosti omrežja v točki priklopa akumulatorja

+/- 15 %. Če temu nihanju prištejemo še padec napetosti na vodnikih, napetost omrežja ni več primerna za neposredno priključitev porabnikov.

2.4.2 Priklop virov na omrežje

Vire električne energije priključimo na omrežje preko DC/DC pretvornikov. Ti pretvorniki skrbijo za pretok proizvedene energije v omrežje ter skrbijo za optimalno proizvodnjo virov. Regulirana veličina pretvornikov je vhodna napetost – to je napetost virov, medtem ko se izhodna napetost pretvornikov samodejno vzpostavi na tako vrednost, da razlika med proizvodnjo in porabo v točki priklopa določenega vira teče v akumulator oz. k drugim porabnikom.

2.4.3 Priklop porabnikov na omrežje

Porabnike smo v čim večji meri poskušali priključiti neposredno na enosmerno omrežje, za porabnike, ki se jih ne da priklopiti na enosmerno napetost, pa smo uporabili DC/AC pretvornik.

Poraba je deloma odvisna od napetosti, kajti nekateri porabniki se obnašajo kot uporovna bremena; če je napetost nižja, je poraba moči tudi nižja ($P = U^2 / R$). Če upoštevamo omejitev, da mora biti nihanje napetosti znotraj +/- 10% nazivne napetosti, potem se moč glede na kvadratno odvisnost od napetosti spreminja znotraj +/- 19% nazivne moči. Ta lastnost nekaterih električnih naprav ima pozitiven učinek na ekonomično porabo: ko je proizvodnja virov nizka, je obratovalna napetost nižja in s tem se zniža tudi poraba. Po drugi strani pa imajo elektronske naprave, kot npr. računalnik, porabo, ki je skoraj neodvisna od napetosti.

2.5 PRIMERI NEKATERIH ZNAČILNIH STANJ OMREŽJA

V tem podpoglavju so opisani trije značilni primeri obratovanja omrežja. Napetost omrežja v točki priklopa akumulatorja vzdržuje akumulator neposredno ali pa preko DC/DC pretvornika, ki povezuje omrežje in akumulator, odvisno od tega, ali moč prejema ali oddaja. Ostale napetosti v omrežju se spreminjajo glede na porabo in proizvodnjo električne energije.

1. Proizvodnja virov je enaka porabi: Nič energije se ne pretaka v ali iz akumulatorja in noben tok ne teče po povezovalnih vodih. Napetosti v vseh točkah omrežja so enake. Ta primer je zgolj teoretičen.

2. Proizvodnja virov je večja od porabe: DC/DC pretvornik, ki povezuje vir z omrežjem, dvigne izhodno napetost in s tem doseže željeni pretok moči od vira v

omrežje in zagotovi optimalno obratovanje vira. Razlika napetosti med točko, kjer je priključen vir in točko, kjer je priključena akumulacija, povzroči pretok moči od vira k akumulatorju. Pri določenem pretoku moči je padec napetosti linearno odvisen od upornosti kabla. Vloga DC/DC pretvornika pri akumulatorju je, da polni akumulator v taki meri, da vzdržuje na strani omrežja konstantno napetost, ki je za 5 % višja od nazivne napetosti. Napetosti omrežja v točki priklopa vira je višja od napetosti pri akumulatorju.

Proizvodnja virov je manjša od porabe: DC/DC pretvornik, ki povezuje vir z omrežjem, zniža izhodno napetost. Razlika napetosti med točko, kjer sta priključena vir in porabnik, in točko, kjer je priključena akumulacija, povzroči pretok moči od akumulatorja do porabnika. Akumulator se v tem primeru prazni in napaja porabnike, njegova napetost pa se zniža do 5 % pod nazivno napetost. Napetosti omrežja v točki priklopa virov oz. porabe je nižja od napetosti pri akumulatorju.

2.6 IZBIRA NAZIVNE NAPETOSTI

Eno glavnih vprašanj pri načrtovanju enosmernega omrežja je nazivna napetost. Ta ima vpliv na ostale parametre omrežja kot so na primer preseki vodnikov, izolacija, varnost obratovanja, kompatibilnost z obstoječimi napravami, izbor stikal in zaščitnih naprav, in na mnoge ostale.

2.6.1 Vpliv napetosti na presek vodnikov

Pri prenosu električne energije nas zanima relativni padec napetosti glede na preneseno moč. Napetost omrežja vpliva na to razmerje na dva načina. Prvič se za enak pretok moči z višanjem napetosti tok lahko linearno zmanjšuje, drugič pa enak tok pri višji napetosti povzroči sicer enak absolutni padec napetosti, a linearno manjši relativni padec napetosti. Tako se za določen pretok moči lahko z višanjem napetosti tok kvadratično zmanjšuje, kar pomeni tudi kvadratično zmanjševanje potrebnih presekov vodnikov.

V obravnavanem omrežju imamo največji možni prenos moči 2.3 kW na razdalji 500 m in pri tem želimo, da relativni padec napetosti ni večji od 5 %. Pri nazivni napetosti $U_n = 230$ V rabimo presek bakrenega vodnika 16 mm^2 , pri $U_n = 48$ V rabimo presek 370 mm^2 in pri $U_n = 12$ V presek 1500 mm^2 . Glede na trenutne cene kablov in DC/DC pretvornikov nam enostaven izračun pokaže, da se pri nazivni napetosti 48 V izplača napetost za prenos zvišati na 230 V, če je razdalja večja od 100 m.

2.6.2 Vpliv napetosti na izolacijo in varnost obratovanja

Ko vpoštevamo varnost obratovanja, so nižje napetosti bolj primerne kot višje. Pravilniki definirajo napetostne razrede, ki so osnova za ostale zahteve, ki obravnavajo zaščito proti električnemu udaru. Pri nizki napetosti sta definirana dva napetostna razreda, ki sta različna za DC in AC sistem inštalacij. Pri izmeničnem omrežju v prvi razred spadajo napetosti od 0 do 50 V, pri enosmernem omrežju pa v ta razred spadajo napetosti od 0 do 120 V. Napetostna razreda sta predstavljena v tabeli I v poglavju 2.6.

2.6.3 Vpliv napetosti na kompatibilnost z obstoječimi električnimi napravami

Električni porabniki so večinoma izdelani za priključitev na izmenično napetost 230 V ali 110 V. Nekatere porabnike, ki so izdelani za priključitev na izmenično napetost, lahko priključimo na enosmerno napetost enake efektivne vrednosti brez preureditve. Taki porabniki so npr. grelci, navadne žarnice z žarilno nitko in univerzalni kolektorski motorji. Ostale naprave pa za priključitev na enosmerno napetost potrebujejo manjšo ali večjo stopnjo preureditve. Če naprave ne moremo preurediti za priklop na enosmerno napetost, jo priključimo preko DC/AC pretvornika, kar pa pomeni dodaten strošek, saj je lahko ta pretvornik dražji od same naprave, ki jo priključujemo.

Obstajajo tudi porabniki za priklop enosmerno napetost 12 oz. 24 V, ki se jih uporablja v povezavi s prevoznimi sredstvi in priključitvijo na akumulator. Večina jih je optimiranih za prenosno uporabo. Če bi jih hoteli priklopiti na omrežje višje napetosti, bi rabili DC/DC pretvornike.

2.6.4 Izbira nazivne napetosti za obravnavani model omrežja

Za digitalno simulacijo obravnavanega omrežja smo izbrali nazivno napetost omrežja 230 V zaradi čim manjšega potrebnega preseka vodnikov in zaradi čim večje kompatibilnosti obstoječih porabnikov za priklop na enosmerno omrežje.

2.7 PRAVILNIKI IN STANDARDI

V nadaljevanju so naštetih slovenski pravilniki in standardi, ki smo jih upoštevati pri zgradbi našega omrežja.

Splošni pogoji za dobavo in odjem električne energije (ETZ, 1986): člen 45 navaja vrednosti nihanja napetosti od + 5 % do – 6 % za izmenično napetost frekvence

50 Hz. To je povzeto po pravilniku o tehničnih pogojih za dobavo električne energije (Ur.l. SFRJ št. 25/69, člen 37). Dejansko pa se glede na JUS N.A2.001 že sedaj dovoljuje +/- 10 % nihanje, kot ga dovoljuje standard IEC.

Standardne napetosti po JUS N.A2.001 po prehodnem obdobju 15 let po sprejetju standarda (Ur.l. SFRJ št. 14/89, povzet po IEC 38 - 1983) naj bi bile za 3-fazni izmenični sistem 230/400 V z največjim dovoljenim nihanjem +/- 10%.

Oznake po standardu JUS N.A9.002 za enosmerne vode so:

- pozitivni vodnik: L+
- negativni vodnik: L-
- srednji vodnik: M

Standard JUS N.B2.702 definira dva razreda napetosti, ki se nanašajo na potrebne ukrepe za zaščito proti električnemu udaru. Je v skladu z IEC 449 iz leta 1973 in z zamenjavo št.1 iz leta 1979.

Razred I se nanaša na:

- instalacije, kjer je zaščita proti električnemu udaru izvedena s posebnimi pogoji z vrednostjo napetosti,
- instalacije, pri katerih je napetost omejena iz funkcionalnih razlogov (telekomunikacije, signalizacija, itd)

Razred II se nanaša na:

- stanovanjske hiše, trgovino, javne zgradbe in industrijo.

Razreda napetosti sta različna za izmenično ali enosmerno napetost in sta predstavljena v tabeli I.

Tabela I: Napetostni razredi za enosmerni in izmenični tok

	Razred I	Razred II
Izmenična nap.	0 - 50 V	50 - 1000 V
Enosmerna nap.	0 - 120 V	120 - 1500 V

Standard JUS N.B2.741 iz leta 1989 govori o varnostnih zahtevah pred električnim udarom v nizkonapetostnih instalacijah: Varnostna mala napetost (angl. SELV – safety extra low voltage) je napetost tokokroga, ki je električno ločen od višjih napetosti s stopnjo ločitve, ki je enakovredna ločitvi varnostnega ločilnega transformatorja. Napetost mora ustrezati razredu I po JUS N.B2.702. Če je napetost

manjša od 25 V za izmenično napetost oz. 60 V za enosmerno napetost ter če je tokokrog neozemljen, ni potrebno izvesti zaščite pred neposrednim dotikom.

Standard JUS N.B2.752 govori o trajno dopustnih tokih za kable v odvisnosti od tipa napeljave. Označevanje kablov mora biti po standardu JUS N.C0.006. Standard JUS N.C0.015 podaja največje dopustne upornosti vodnikov v kabliah.

Nizkonapetostne instalacije obravnava Pravilnik o tehničnih normativih za nizkonapetostne električne instalacije (TP 2/89, Ur.l. SFRJ št. 53/88). Predpisuje minimalne prereze vodnikov za stalne inštalacije. Vrednosti se nanašajo na izmenično napetost 230 V, 50 Hz. Minimalni prerezi za bakreni vodnik so 1,5 mm² za razsvetljavo oz. 2,5 mm² za ostalo inštalacijo. Pravilnik tudi predpisuje ventilacijo prostorov, kjer so nameščeni akumulatorji. Predpisuje pretvornike, ki imajo električno ločitev vhoda in izhoda s transformatorjem.

Tehniški normativi za gradnjo nadzemnih elektroenergetskih vodov (TP 4/73) veljajo za nizkonapetostne vode. Predpisuje minimalne preseke nadzemnih vodov, ki znašajo za bakrene vodnike 6 mm² in za aluminijaste vodnike 16 mm².

V pripravi je slovenski Zakon o lokalnih neodvisnih proizvajalcih električne energije (ZLNeoP), ki bo določal načine vključevanja razpršene proizvodnje v javno električno omrežje.

3. DEFINICIJA PORABE

3.1 SPLOŠNO O PORABNIKIH

Pri obravnavi porabnikov so za obratovanje obravnavanega omrežja pomembna moč posameznega porabnika, zagonski tokovi, časovni potek obratovanja posameznega porabnika ter istočasnost delovanja večih porabnikov. Glede na to, da je predmet magistrskega dela enosmerno omrežje, smo proučili tudi možnost priklopa posameznih porabnikov na enosmerno napetost.

Obstoječi električni porabniki so večinoma izdelani za priključitev na izmenično napetost 230 V ali 110 V. Obstajajo tudi porabniki za priključitev na enosmerno napetost 12 oz. 24 V, ki jih uporabljamo v povezavi s prevoznimi sredstvi in priključitvijo na akumulator.

Detajlnejši pregled pokaže, da posamezni porabniki, ki so večinoma izdelani za priključitev na izmenično napetost potrebujejo za priklop na enosmerno napetost enake efektivne vrednosti, manjše ali večje spremembe. Glede na možnost priključitve na enosmerno omrežje jih lahko razdelimo v več skupin.

V prvi skupini so porabniki, ki jih na enosmerno omrežje lahko priključimo neposredno: to so razni grelci, žarnice z žarilno nitko, univerzalni kolektorski motorji in podobno.

Sledijo porabniki, ki za priklop na enosmerno napetost potrebujejo minimalne prilagoditve. To so elektronske naprave kot npr. televizor, video in audio naprave, mikrovalovne pečice, varčne žarnice, ki imajo na svojem vhodu AC/DC pretvornike. V to skupino bi lahko uvrstili tudi aparate z univerzalnim kolektorskim motorjem, to so mali gospodinjski aparati, ročno električno orodje itd.

V naslednjo skupino spadajo kompleksne naprave, kot npr. pralni stroj, ki vsebuje večje število porabnikov. Posamezni deli teh naprav – npr. grelci in univerzalni kolektorski motorji za pogon bobna – se na enosmerno napetost priključijo brez težav, nekateri drugi deli pa potrebujejo DC/AC pretvornike.

V zadnjo skupino spadajo električni porabniki, ki za svoje delovanje potrebujejo izmenično napetost in jih moramo na enosmerno omrežje priključiti preko DC/AC pretvornikov. To so predvsem sinhronski in asinhronski motorji ter naprave, ki take motorje vsebujejo, to so kompresorji za hladilnik, oljni gorilci, itd.

Ena večjih težav pri uporabi enosmerne napetosti je izklop induktivnih bremen. Pri izmenični napetosti oblok, ki lahko nastane pri izklopu, ugasne, ko gre napetost skozi nič, pri enosmerni napetosti pa napetost ne pade in je prekinitev toka težja.

3.2 TIPI PORABNIKOV ZA STANOVANJSKO HIŠO

Poraba stanovanjske enote v obravnavanem modelu enosmernega omrežja vključuje naslednje elemente: razsvetljava, hladilnik, skrinja, pralni in pomivalni stroj, likalnik, sušilec za lase, mikrovalovna pečica, mali gospodinjski aparati, TV aparat, video in audio naprave, računalnik in oljni gorilec. Na ta način smo zajeli praktično ves spekter možnih porabnikov. Ker je električna energija, proizvedena iz alternativnih virov ali gorivnih celic relativno draga, je smiselno z električno energijo čimbolj varčevati. Iz tega sledi, da se električna energija ne uporablja za ogrevanje in hlajenje prostorov ter za kuhanje, poleg tega pa je predvidena uporaba energetske varčnih električnih naprav.

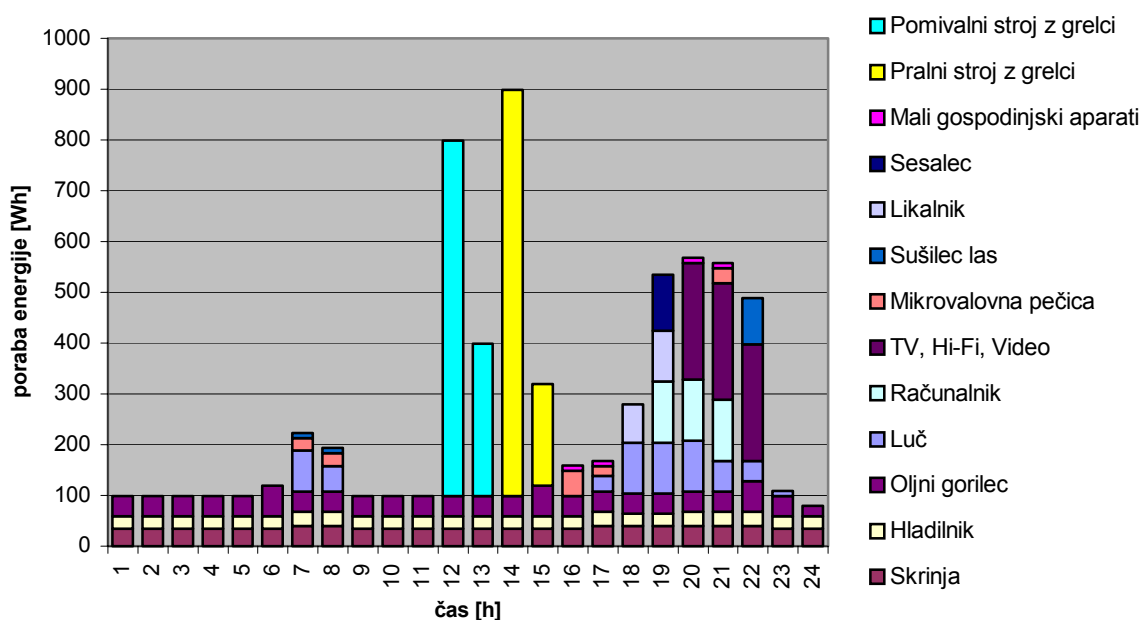
Posamezni porabniki so zbrani v tabeli II. Tabela prikazuje moč in obratovalni čas posameznih porabnikov za mesec januar in julij. Podatki so bili določeni glede na različne verjetne scenarije porabe po [26, 56] ter glede na izkušnje iz lastnega gospodinjstva.

Tabela II: Karakteristike porabnikov

Porabnik	Moč [W]	Januar		Julij	
		Obratovalni čas [h]	Poraba energije [Wh]	Obratovalni čas [h]	Poraba energije [Wh]
Luč-bivalni prostori	60	6	360	4	240
Luč-pomožni prostori	20	3	60	2	40
Luč-delovna soba	30	5	150	3	90
Skrinja	105	8	880	8	840
Hladilnik	80	8	600	8	640
Računalnik	120	3	360	3	360
TV, Hi-Fi, Video	230	3	690	3	690
Mikrovalovna pečica	500	0,3	150	0,3	150
Sušilec las	550	0,2	110	0,2	110
Likalnik	350	0,5	175	0,2	70
Sesalec	550	0,2	110	0,2	110
Mali gospodinjski aparati	200	0,2	40	0,2	40
Pralni stroj - grelci	2000	0,3	600	0,3	600
Pralni stroj - motor	300	1	300	1	300
Pralni stroj - ostalo	91	1	91	1	91
Pralni stroj - črpalka	30	0,3	9	0,3	9
Pomivalni stroj - grelci	2000	0,4	800	0,4	800
Pomivalni stroj - črpalka 1	230	0,8	184	0,8	184
Pomivalni stroj - črpalka 2	60	0,1	6	0,1	6
Pomivalni stroj -ostalo	10	1	10	1	10
Oljni gorilec	250	4	1000	0,5	125
Skupaj		<i>Januar:</i>	6685	<i>Julij:</i>	5505

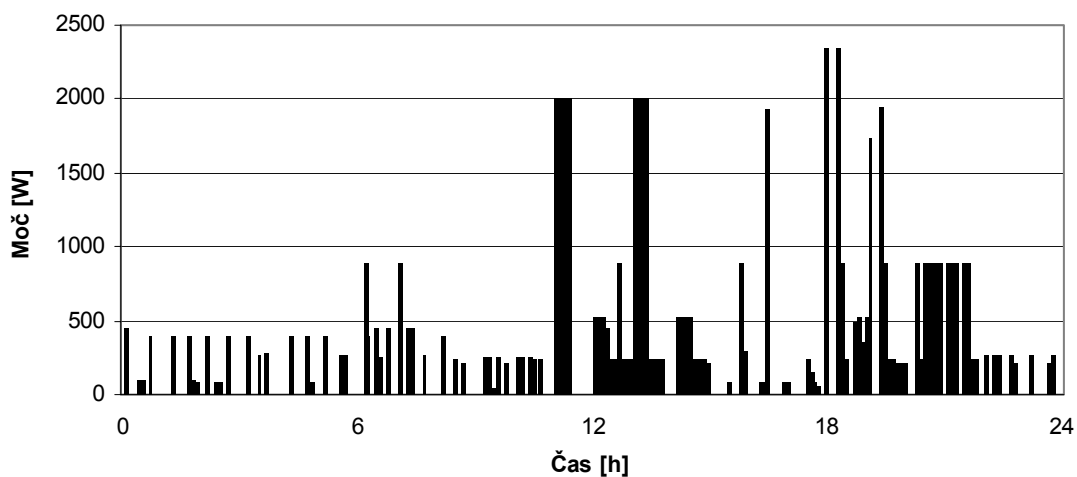
Za vsak posamezen porabnik smo predpostavili, kdaj in koliko časa obratuje. Tako dobljena časovna razporeditev porabe energije je prikazana na sl. 3.1 Diagram prikazuje povprečno urno porabo energije kot vsoto posameznih porabnikov. Večja bremena, kot npr. pralni stroj, ki vsebuje grelec moči okrog 2 kW, naj bi bili v obratovanju samo takrat, ko je poraba ostalih naprav manjša in proizvodnja virov visoka.

Izdelana sta bila tudi neurejeni ter urejeni dnevni diagram porabe ene stanovanjske hiše. Dnevni diagram porabe je izdelan za šest-minutni interval, pri čemer je največja moč določena kot hkratno delovanje 75 % vseh električnih porabnikov, brez upoštevanja pralnega in pomivalnega stroja. Poteka moči v obliki neurejenega in urejenega urejenega dnevnega diagrama porabe za januar sta prikazana na sl. 3.2 in sl. 3.3.

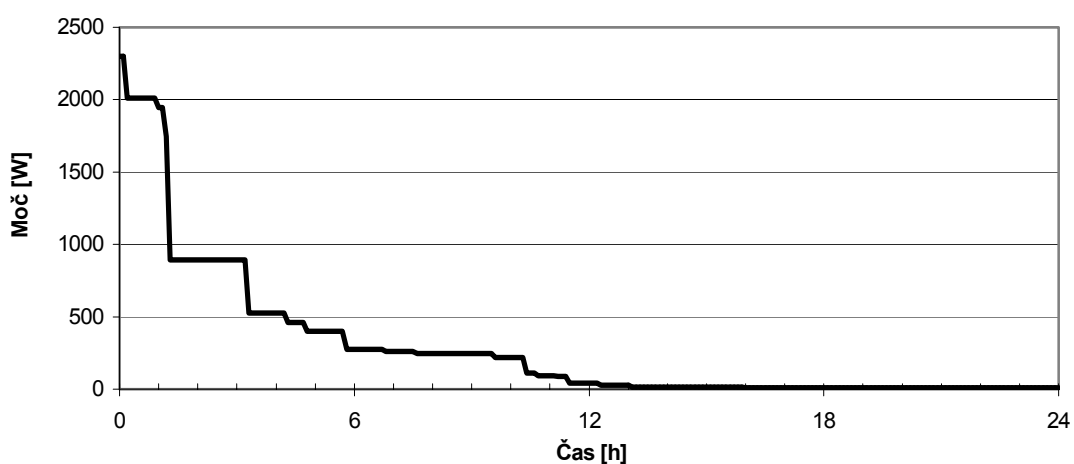


Sl. 3.1: Časovna razporeditev porabe energije – enourni intervali

Kot je razvidno iz tabele II ter iz sl. 3.2 in sl. 3.3, je povprečna poraba električne energije ene stanovanjske hiše 6685 Wh/dan v zimskem času oz. 5505 Wh/dan v poletnem času. Največja moč znaša 2350 W in traja 12 minut, moč nad 2000 W traja eno uro, medtem ko je polovico dneva moč manjša od 100 W. Največjo porabo energije predstavljajo 2 kW grelci v pralnem in pomivalnem stroju. Večja bremena naj bi bili v obratovanju samo takrat, ko je poraba ostalih naprav manjša in proizvodnja virov visoka.



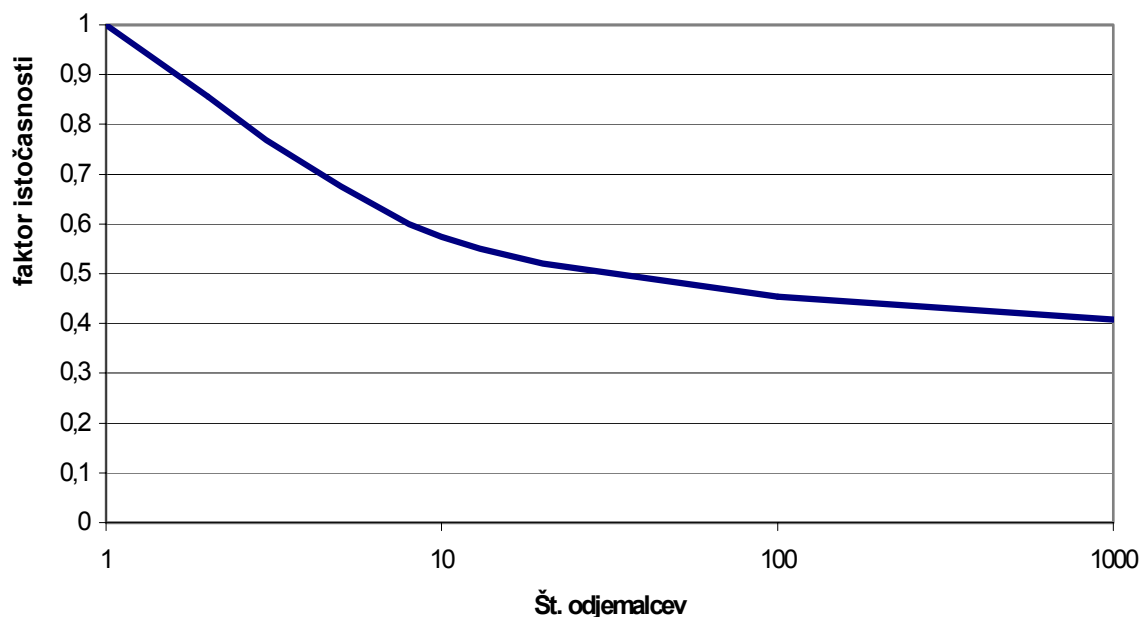
Sl. 3.2: Neurejeni dnevni diagram porabe



Sl. 3.3: Urejeni dnevni diagram porabe

3.3 FAKTOR ISTOČASNOSTI

Faktor istočasnosti vpliva na največjo moč, ki jo mora elektroenergetski sistem zagotavljati. Pri osmih odjemalcih (stanovanjskih hišah) znaša ta faktor 0,6 [1]. Faktor istočasnosti za različno število odjemalcev je prikazan na sl. 3.4 [1]. Za obravnavani primer, kjer imamo samo tri stanovanjske hiše in kjer največjo porabo lahko predstavlja en sam porabnik (pralni stroj), ima faktor istočasnosti minimalen vpliv. Zato upoštevamo, da največja moč porabe lahko nastopi v vseh treh hišah hkrati.



Sl. 3.4: Faktor istočasnosti po [1]

3.4 KARAKTERISTIKE POSAMEZNIH PORABNIKOV

3.4.1 Razsvetljava

Uporaba varčnih žarnic je glede na visoko ceno električne energije, pridobljene iz alternativnih virov, priporočljiva, saj porabijo približno 5-krat manj energije za isto svetilnost. Na tržišču obstajajo modeli za priklop na izmenično napetost 230 oz. 110 V ter za enosmerno napetost 12 V. Slednje so nekajkrat dražje od prvih.

Varčnih žarnic za priklop na enosmerno napetost 230 V, kolikor znaša napetost obravnavanega omrežja, ni, ker zanje ni povpraševanja. Ker imajo varčne žarnice v notranjosti AC/AC pretvornik, bi se načeloma dokaj enostavno prilagodile na enosmerno napetost s spremembo pretvornika v DC/AC pretvornik.

Klasične žarnice z žarilno nitko lahko priklopimo tako na enosmerno kot na izmenično napetost.

3.4.2 Hladilnik in zamrzovalna skrinja

Hladilniki in zamrzovalne skrinje imajo AC motor za pogon kompresorja. Zamenjava s primernim DC motorjem bi bila za nestrokovnjaka komplicirana naloga, za proizvajalca pa ne tako težka naloga. Trenutno bi bila najlažja varianta uporaba DC/AC pretvornika, ki bi moral biti sposoben zagotoviti zagonski tok kompresorja, ki je okrog petkrat večji od nazivnega toka.

Energijsko varčni hladilniki porabijo okrog 0.6 kWh/dan, moč kompresorja je okrog 80 W [4]. Energijsko varčne zamrzovalne skrinje porabijo okrog 0.9 kWh/dan, moč kompresorja pa je okrog 105 W [4]. Zagoni tok kompresorja je 5-kratnik nazivnega toka [5].

Na tržišču obstajajo tudi modeli za priključitev na 12 oz. 24 V enosmerno napetost. Izbira le-teh je majhna v primerjavi z modeli za 230 oz. 110 V AC, cenovno so precej dražji, ker so specialni modeli – predvsem za vgradnjo v jahte, avtobuse in avtodome. Obstajajo kompresorji za enosmerno napetost, ki se vgrajujejo v klimatske naprave, ki regulirajo moč delovanja s spreminjanjem moči kompresorja [6].

Glede na trenutne cene bi bil klasični hladilnik ter DC/AC pretvornik ugodnejši način.

3.4.3 Računalnik, televizor, video, audio in ostale elektronske naprave

Elektronske naprave delujejo na enosmerni napetosti, ki jo dobijo iz omrežja izmenične napetosti preko vgrajenega usmernika AC/DC. S stališča priklopa na enosmerno napetost bi bilo potrebno AC/DC usmernik prilagoditi v DC/DC pretvornik.

3.4.4 Pralni stroj

Glavni porabnik v pralnem stroju je grelec. Poraba energije znaša okrog 1 kWh za eno pranje. Nazivna moč grelca je okrog 2,2 kW. Motor za pogon bobna je univerzalni kolektorski motor, napajan in reguliran z enosmerno napetostjo, ki jo dobimo iz AC/DC pretvornika, ki služi kot regulator hitrosti vrtenja. Ta motor je ponavadi moči okrog 300 W. Črpalka za vodo je približno 30 W sinhronski motor s permanentnim magnetom. Za priklop na enosmerno napetost bi bilo potrebno pralni stroj detajlneje proučiti, načeloma pa priklop grelca in univerzalnega kolektorskega motorja na enosmerno napetost ni problematičen.

3.4.5 Pomivalni stroj

Pri pomivalnem stroju je situacija podobna kot pri pralnem stroju – glavni porabnik je grelec. Poraba električne energije znaša okrog 1 kWh za eno pranje, nazivna moč grelca znaša 2,2 kW. Motor črpalke za pranje je asinhronski motor. Ta motor je ponavadi moči okrog 250 W. Za priklop na enosmerno napetost bi bilo potrebno pralni stroj detajlneje proučiti.

3.4.6 Gospodinjski aparati

Mali gospodinjski aparati vsebujejo univerzalni kolektorski motor, ki lahko obratuje na izmenično in enosmerno napetost. Potrebno bi bilo proučiti primernost stikal za vklop in izklop.

Mikrovalovna pečica je standardno izdelana za 230 oz. 110 V AC. Obstajajo tudi modeli za 12 ali 24 V DC [7, 8], katerih cena je trenutno približno 2-krat višja kot za standardne mikrovalovne pečice – okrog 650 EUR. Ker imajo mikrovalovne pečice v notranjosti AC/AC pretvornik, bi se načeloma dokaj enostavno prilagodile na enosmerno napetost s spremembo pretvornika v DC/AC pretvornik.

Likalnik za priklop na izmenično napetost vsebuje grelec, ki se ga načeloma lahko priklopi tudi na enosmerno napetost. Vprašljiva so stikala.

Sušilnik za lase tudi vsebuje grelec, ki se ga načeloma lahko priklopi tudi na enosmerno napetost. Obstajajo modeli z asinhronskim ali univerzalnim kolektorskim motorjem za pogon ventilatorja. Vprašljiva je primernost stikal, ki so dimenzionirana za izklop izmeničnega toka.

3.5 U/I KARAKTERISTIKE PORABNIKOV

Porabniki imajo različne U/I karakteristike. V glavnem bi jih lahko razdelili v tri skupine:

1. Ohmska bremena: Pri ohmskih bremenih pada tok linearno s padanjem napetosti, in posledično moč s kvadratom napetosti ($P = U^2 / R$). Primer takih bremen so grelci in žarnice z žarilno nitko. Vpliv takih bremen na omrežje je ugoden, saj je ob manjši proizvodnji električne energije in s tem nižji napetosti omrežja njihova poraba manjša.

2. Elektronske naprave: Elektronske naprave vsebujejo AC/DC konverterje, ki iz omrežja vzamejo toliko moči, kot jo potrebujejo. Tako ostaja njihova moč neodvisna od napetosti.

3. Univerzalni kolektorski motor, pri katerem je hitrost vrtenja skoraj linearno odvisna od napetosti, moč pa je odvisna od tipa bremena oz. od odvisnosti bremenskega momenta glede na vrtljaje.

4. DEFINICIJA VIROV

4.1 KRAJEVNI POLAŽAJ IN MOČ VIROV

Pri razpršeni proizvodnji so viri električne energije postavljeni blizu porabe, to je v obravnavanem primeru v bližini posameznih stanovanjskih enot. Akumulacija električne energije se nahaja na enem mestu, to je v eni od stanovanjskih enot.

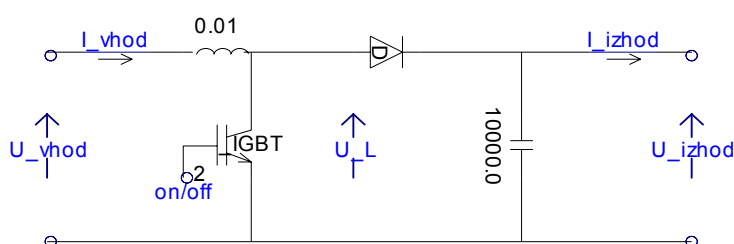
Moč virov je dimenzionirana tako, da pokrivajo povprečno porabo. Kot rezervni vir za primer nizke proizvodnje iz obnovljivih virov (primer hkratne oblačnosti, brezveterja in nizkega pretoka vode mikro hidroelektrarne) nam služi gorivna celica za soproizvodnjo toplote in električne energije, ki sicer deluje toliko, kolikor potrebujemo toplote. V primeru primanjkovalja električne energije pa se gorivna celica uporabi za polnjenje akumulatorja. S tem rezervnim virom se občutno zmanjša potrebna kapaciteta akumulacije električne energije.

4.2 PRIKLJUČITEV VIROV NA OMREŽJE

Viri so na omrežje priključeni preko DC/DC pretvornikov. Ti pretvorniki skrbijo za pretok proizvedene energije v omrežje ter skrbijo za optimalno proizvodnjo virov. Princip delovanja DC/DC pretvornikov je v osnovi za vse tipe virov približno enak, vsak vir pa ima pri obratovanju še specifične zahteve, ki jih mora pretvornik izpolnjevati.

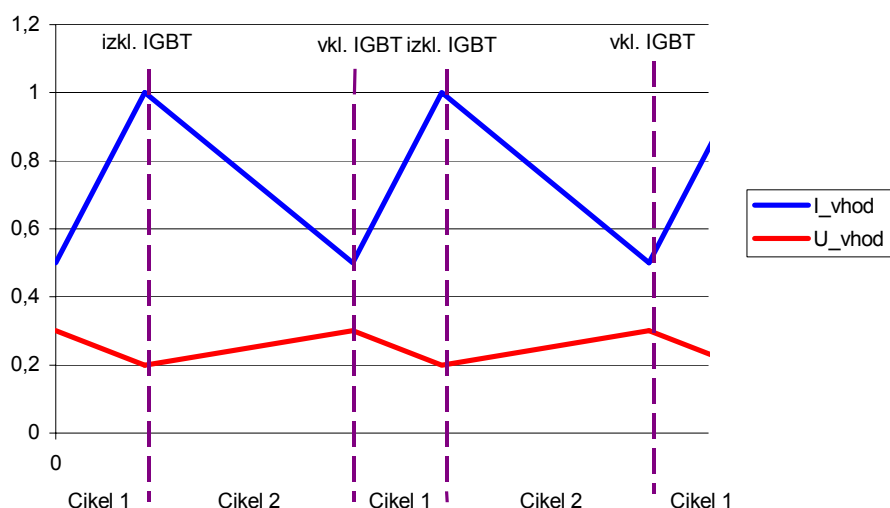
4.2.1 Princip delovanja DC/DC pretvornikov

Za obravnavano omrežje potrebujemo DC/DC pretvornike navzgor, ki zvišujejo napetost. Pretvornik je sestavljen iz tuljave, polprevodniškega stikala – IGBT, diode in kondenzatorja. Shema pretvornika je prikazana na sl. 4.1. Pretvornik zviša napetost s pomočjo inducirane napetosti v tuljavi. Dogajanje v pretvorniku lahko razdelimo na dva cikla. Poteki posameznih veličin – to je tokov in napetosti – so prikazani na sl. 4.2 za vhodne veličine in na sl. 4.3. za izhodne veličine [9, 10, 11, 17].

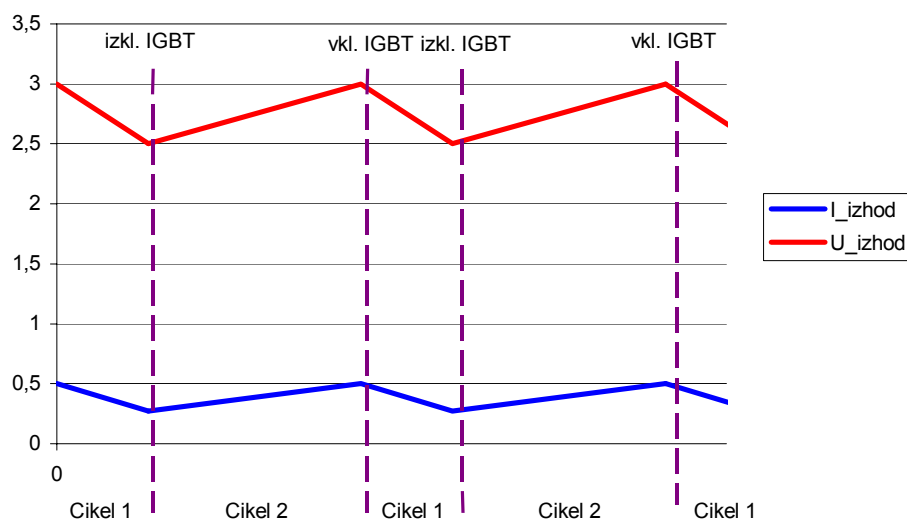


Sl. 4.1: Shema DC/DC pretvornika navzgor

V prvem ciklu je polprevodniško stikalo IGBT v stanju prevajanja. Vhodni tok I_{vhod} teče skozi tuljavo in IGBT in se linearno povečuje. Glede na U/I karakteristiko vira, ki napaja pretvornik, se spreminja tudi vhodna napetost U_{vhod} – v prikazanem primeru ta napetost pada. Napetost za tuljavo U_L je nižja od izhodne napetosti U_{izhod} , zato prek diode tok ne teče. Izhodni tok I_{izhod} teče iz kondenzatorja, pri čemer napetost kondenzatorja in s tem tudi izhodna napetost U_{izhod} pada.



Sl. 4.2: Napetost in tok na vhodu DC/DC pretvornika



Sl. 4.3: Napetost in tok na izhodu DC/DC pretvornika

V drugem ciklu preide polprevodniško stikalo IGBT v zaporno stanje. Ker v tuljavi teče tok, ki se ne more skočno prekiniti, se v tuljavi inducira napetost in s tem napetost za tuljavo U_L naraste nad izhodno napetost U_{izhod} . Ta inducirana napetost požene tok preko diode v kondenzator in na izhod pretvornika. V tem ciklu se vhodni

tok I_{vhod} zmanjšuje, vhodna napetost U_{vhod} pa narašča glede na U/I karakteristiko vira. Ker tok, ki teče preko diode, polni kondenzator, se njegova napetost viša in s tem se viša tudi izhodni tok I_{izhod} . Vhodne in izhodne napetosti na sl. 4.2 in 4.3 veljajo za vir, katerega napetost z naraščanjem toka linearno pada in za konstantno ohmsko breme.

4.2.2 Regulacija DC/DC pretvornikov

Razmerje med vhodno in izhodno napetostjo je odvisno od razmerja med trajanjem prvega in trajanjem drugega cikla. Čim daljši je prvi cikel, tem višja je izhodna napetost. Razmerje med trajanjem prvega in drugega cikla, ki določa razmerje med vhodno in izhodno napetostjo, se lahko regulira na različne načine.

Prvi način je pulzno frekvenčna modulacija (angl. PFM – pulse-frequency modulation). Pri tem načinu je dolžina prvega cikla, ko je IGBT v prevodnem stanju, konstantna, dolžina drugega cikla pa spreminjamo glede na to, kakšno razmerje med vhodno in izhodno napetostjo želimo. To pomeni, da je dolžina regulacijskega pulza, ki določa prevajanje IGBT, konstantna, frekvenca teh pulzov pa se spreminja.

Drugi način je pulzno-širinska modulacija (angl. PWM – pulse-width modulation). Pri tem načinu je vsota trajanja obeh ciklov konstantna, razmerje med vhodno in izhodno napetostjo pa se določi z razmerjem med trajanjem prvega in drugega cikla. To pomeni, da je dolžina regulacijskega pulza, ki določa prevajanje IGBT, spremenljiva, frekvenca pulzov pa je konstantna.

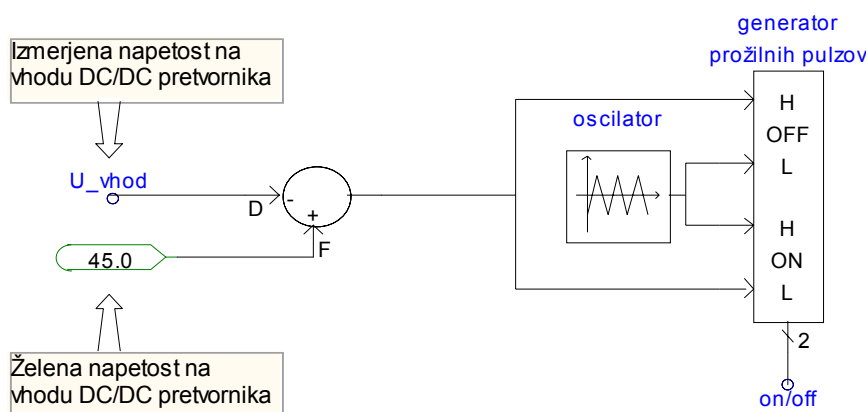
Obstajajo še drugi načini reguliranja trajanja posameznega cikla, npr. tokovna histerezna regulacija, kjer je trajanje posameznega cikla odvisno od velikosti toka skozi tuljavo. V tem primeru IGBT prevaja, dokler tok v tuljavi ne preseže določene vrednosti, potem pa se IGBT izklopi in ne prevaja do tistega trenutka, ko tok tuljave pade pod določeno velikost. Takrat se IGBT spet vklopi in proces se ponovi.

Ker posamezni elementi DC/DC pretvornika niso idealni, tudi razmerje med izhodno in vhodno napetostjo ne more biti poljubno veliko. Minimalni čas prevajanja IGBT realnega DC/DC prevornika ni nič, ampak znaša od 5 % do 10 % časa ene periode. Prav tako najdaljši čas prevajanja ni celotna perioda, temveč znaša od 85 % do 90 % časa ene periode [18]. Iz tega sledi, da je izhodna napetost lahko kvečjemu nekajkrat višja od vhodne.

V našem omrežju smo za regulacijo DC/DC pretvornikov uporabili pulzno-širinsko modulacijo, ki ima relativno visok izkoristek, poleg tega pa ima zaradi konstantne preklopne frekvence ozek spekter šuma, ki se ga lažje filtrira [17].

4.2.3 Izvedba pulzno-širinske modulacije

Za DC/DC pretvornika smo za program PS CAD izdelali model regulacije, ki proizvaja signal za vklop in izklop IGBT. Signal vklaplja IGBT s konstantno frekvenco, trenutek izklopa pa se določi glede na regulirano veličino. V primeru na sl. 4.4, ki prikazuje regulacijsko vezje, je ta regulirana veličina vhodna napetost, lahko pa bi bil reguliran tudi vhodni tok.

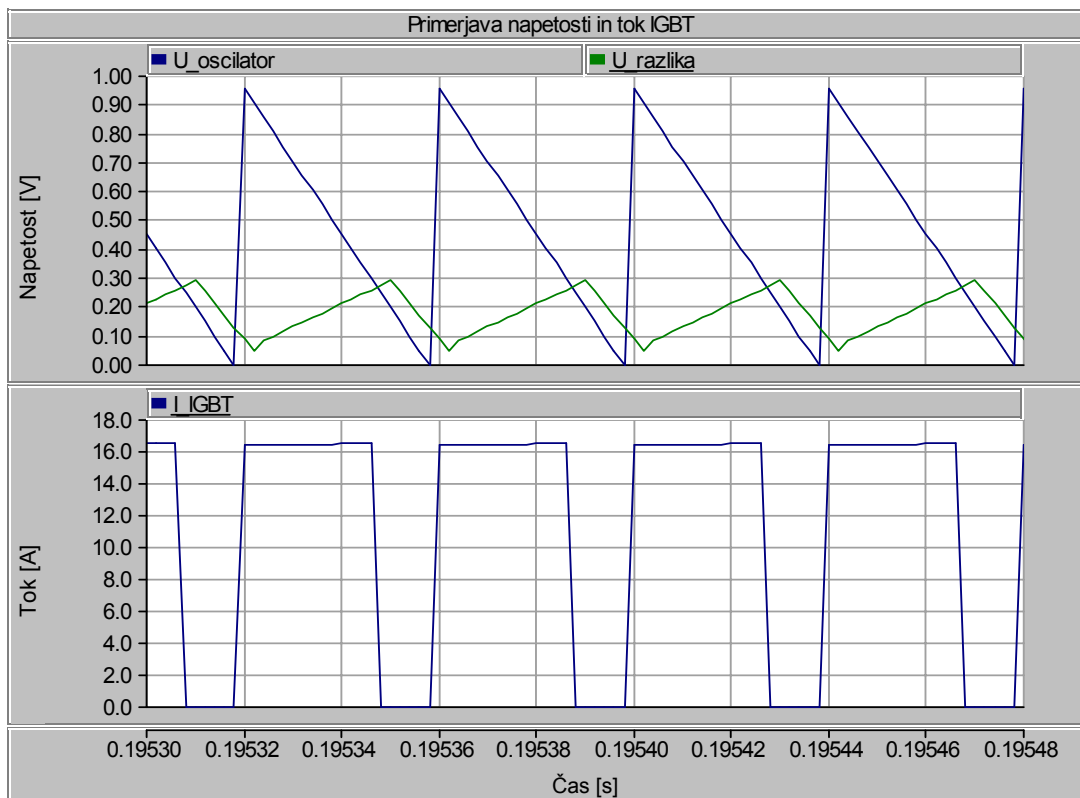


Sl. 4.4: Regulacijsko vezje vklopa in izklopa IGBT s pulzno-širinsko modulacijo

Na sl. 4.5 je na prvem grafu prikazana napetost oscilatorja $U_{oscilator}$ in razlika med izmerjeno in želeno napetostjo $U_{razlika}$, na drugem grafu pa tok skozi polprevodniško stikalo IGBT. Oscilator proizvaja napetost žagaste oblike s hitrim dvigom in počasnim padanjem napetosti. Frekvenca žagaste napetosti je konstantna in znaša 25 kHz, amplituda pa znaša 1 V.

Generator prožilnih pulzov primerja napetostno razliko $U_{razlika}$ med izmerjeno in želeno napetostjo na vhodu DC/DC pretvornika z žagasto napetostjo oscilatorja $U_{oscilator}$. Ob dvigu napetosti $U_{oscilator}$ se le-ta napetost zviša nad vrednost $U_{razlika}$ in generator prožilnih impulzov generira pulz za vklop IGBT. Po vklopu začne vhodni tok DC/DC pretvornika naraščati, napetost pa padati in s tem razlika med želeno in izmerjeno napetostjo $U_{razlika}$ narašča. Ko ta razlika naraste nad napetost $U_{oscilator}$, generator prožilnih impulzov generira pulz za izklop IGBT in vhodna napetost DC/DC pretvornika začne zaradi zmanjševanja toka naraščati in narašča vse do naslednjega dviga žagaste napetosti na oscilatorju. Naraščanje vhodne napetosti U_{vhod} se na sl. 4.5 odraža kot padanje napetosti $U_{razlika}$.

Iz sl. 4.5 je poleg tega razvidna tudi zakasnitev vklopa in izklopa IGBT za 2 do 4 μ s, kar je posledica koraka integracije digitalne simulacije, ki znaša 2 μ s.



Sl. 4.5: Žagasta napetost oscilatorja in razlika med izmerjeno in zeleno napetostjo ter tok IGBT

4.3 SONČNE CELICE

4.3.1 Splošno o sončnih celicah

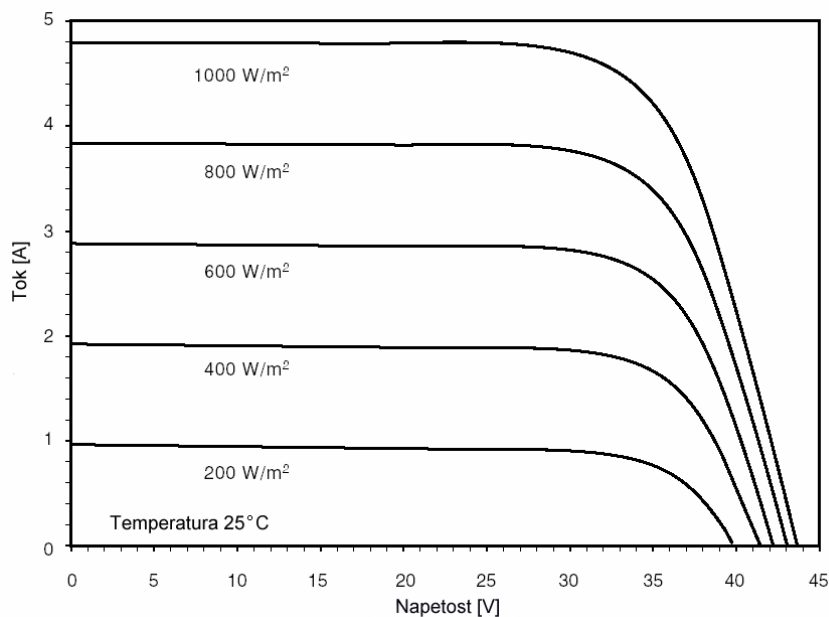
Sončne celice so polprevodniške naprave z veliko površino p-n spoja, ki mora biti čimbolj na površju. Trenutno najbolj razširjen polprevodniški material za izdelavo sončnih celic je silicij (Si). Polprevodnost se lahko izkorišča tudi pri nekaterih drugih materialih kot na primer germanij – Ge, kadmijev sulfid – CdS, kadmijev arsenid – CdAs, bakrov sulfid – Cu₂S, kadmijev telurid – CdTe, itd. Ko sončne celice obsevamo s svetlobo, pretvarjajo energijo svetlobe neposredno v električno energijo. Enosmerna električna napetost sončne celice znaša okrog 0.5 V. Da dosežemo višje in s tem bolj uporabne napetosti, posamezne celice zaporedno vežemo v sončne module.

Izkoristek je odvisen od vpadnega kota sončnih žarkov na sončno celico. To pomeni, da sončni moduli morajo slediti položaju sonca. To sledenje je lahko enoosno ali dvoosno, torej glede na čas dneva po navpični osi in glede na letni čas po horizontalni osi. Proizvedena moč lahko zelo niha, kar je posledica kratkotrajnih oblačnosti. Pri enoosnem sledenju je izkoristek sončne celice zaradi manjšega vpadnega kota sončnih žarkov zmanjšan za približno 20 %, brez sledenja pa za 35 % [1].

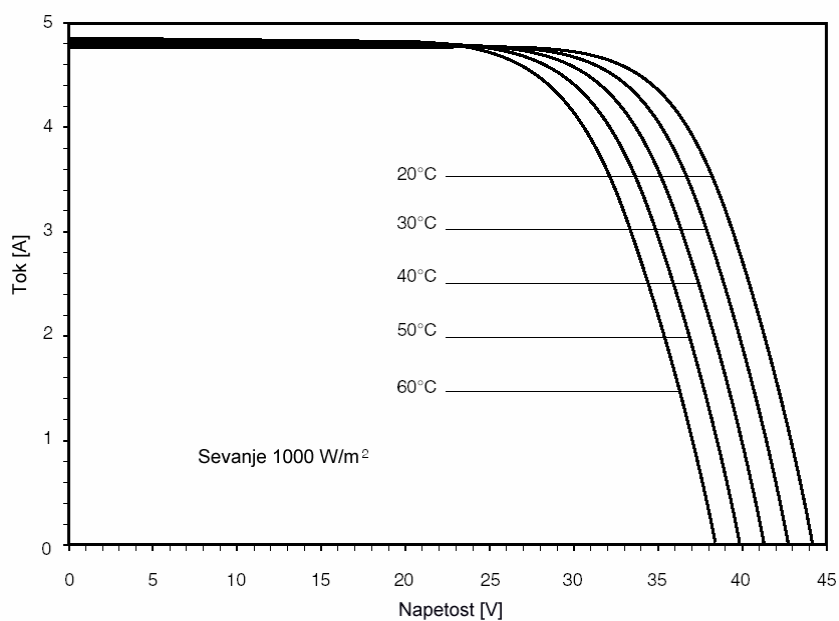
Moč sončnih celic v obravnavanem primeru je zaradi visoke specifične cene sončnih celic izbrana tako, da pokrivajo povprečno porabo ene stanovanjske hiše le ob sončnem poletnem dnevu. Tako znaša moč inštaliranih sončnih celic 1 kW.

4.3.2 Električni parametri sončnih celic

Sončna celica je napetostni vir, katerega napetost je odvisna od toka, osvetljenosti in temperature. Napetost sončne celice se pri manjših tokovih do 80 % nazivnega toka linearno zmanjšuje do 85 % napetosti odprtih sponk. Pri nazivnem toku znaša napetost 78 % napetosti odprtih sponk, pri večjih tokovih pa se napetost hitro manjša in se pri 110 % nazivnega toka popolnoma sesede. U/I karakteristike v odvisnosti od osvetljenosti in od temperature sončne celice so prikazane na sl. 4.6 oz. 4.7. Prikazane karakteristike se nanašajo na sončne module proizvajalca Shell, model SP 150.



Sl. 4.6: karakteristika sončne celice v odvisnosti od sončnega sevanja



Sl. 4.7: karakteristika sončne celice v odvisnosti od temperature

4.3.3 Regulacija sončnih celic

Kot je razvidno iz U/I karakteristik sončnih celic na sl. 4.6 in 4.7, napetost sončne celice ni konstantna. Če jo priključimo neposredno na omrežje s konstantno enosmerno napetostjo – na primer na akumulator, mora sončna celica pri tej napetosti proizvajati nek zadovoljiv tok pri vseh zunanjih pogojih. To pomeni, da je sončni modul s karakteristiko po sl. 4.7 v primeru neposrednega priklopa na enosmerno omrežje primeren za obratovanje na napetosti okrog 30 V, pri višji

napetosti omrežja pa bi optimalno deloval le pri nižjih temperaturah. Ker je v tem primeru obratovalna napetost 30 V nižja od nazivne napetosti 34 V, moč sončne celice ne dosega nazivne moči. Glede na relativno visoko ceno sončnih celic v primerjavi s ceno energetske elektronike je ekonomsko smiselno sončne celice na enosmerno omrežje priključiti preko DC/DC pretvornika. Ta pretvornik mora regulirati napetost sončne celice tako, da deluje z največjo možno močjo. Sledenje točki največje moči (angl. maximum power point tracking – MPPT) pomeni, da se napetost sončne celice sproti prilagaja zunanjim pogojem obratovanja, to je temperaturi in sončnemu sevanju.

Sledenje točki največje moči je možno na več načinov. Največkrat uporabljeni metodi ugotavljanja optimalne obratovalne napetosti sončne celice sta dve. Po prvi metodi se optimalna obratovalna napetost določi glede na napetost odprtih sponk [12]. Da se napetost odprtih sponk lahko izmeri, se mora tok sončne celice v določenih intervalih za kratek čas prekiniti, npr. vsako sekundo za eno milisekundo. Druga metoda ugotavljanja optimalne obratovalne napetosti sončne celice je ta, da se meri spremembo moči glede na spremembo napetosti [13, 15, 16]. Pri tem se lahko uporabi tudi mehka logika, ki dodatno izboljšuje sledenje točki največje moči [14].

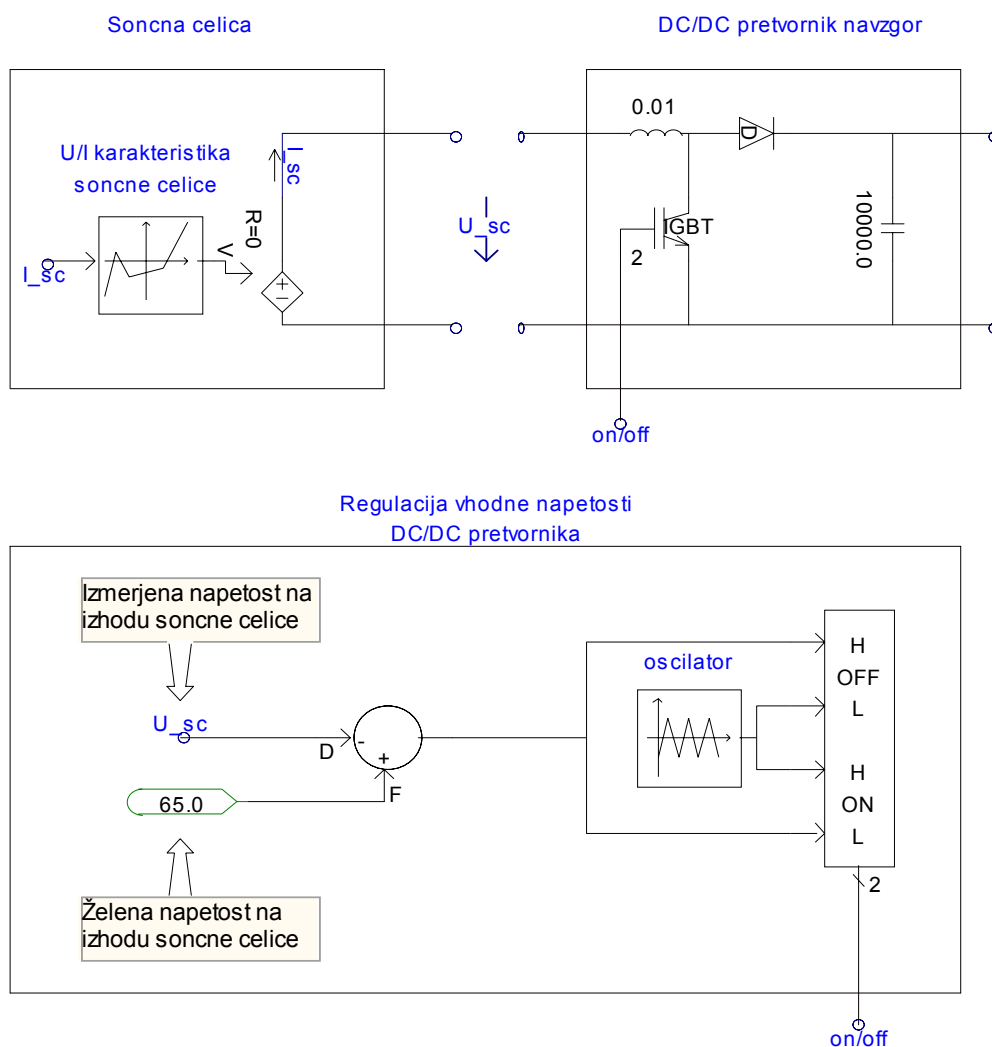
Poleg sledenja točki največje moči DC/DC pretvornik omejuje napetost omrežja, da se ob veliki proizvodnji in majhni porabi ne zviša na napetost odprtih sponk sončne celice, kar bi se zgodilo pri neposrednem priklopu sončne celice na omrežje. Prav tako DC/DC pretvornik omejuje tok sončne celice, da se pri preveliki obremenitvi napetost ne sesede.

DC/DC pretvornik zagotovi vse zgoraj omenjene naloge z regulacijo vhodne napetosti na strani sončnih celic. Generirana izhodna napetost na strani omrežja zagotovi pretok proizvedene energije v omrežje. Če omrežje ne more sprejeti vse proizvedene energije sončnih celic, bi se pri konstantni vhodni napetosti izhodna napetost dvignila preko največje dovoljene napetosti. V tem primeru DC/DC pretvornik vhodno napetost – to je napetost sončne celice – zviša in glede na U/I karakteristiko sončne celice (glej sl. 4.6) se njena moč zmanjša.

V primeru, da sončna celica porabnikom ne zagotovi zadostne moči, bi se pri konstantni vhodni napetosti izhodna napetost znižala pod najmanjšo dovoljeno napetost. Ker taka napetost ni dopustna, se sončna celica odklopi od omrežja. Do takega stanja pri normalnih pogojih obratovanje ne pride, saj je potrebna moč porabnikov zagotovljena iz akumulacije.

4.3.4 Model sončne celice in DC/DC pretvornika z regulacijo

Za izvedbo digitalne simulacije enosmernega omrežja s programom PS CAD / EMTDC je bil izdelan model sončne celice in DC/DC pretvornika s pulzno-širinsko modulacijo, ki je prikazan na sl. 4.8.



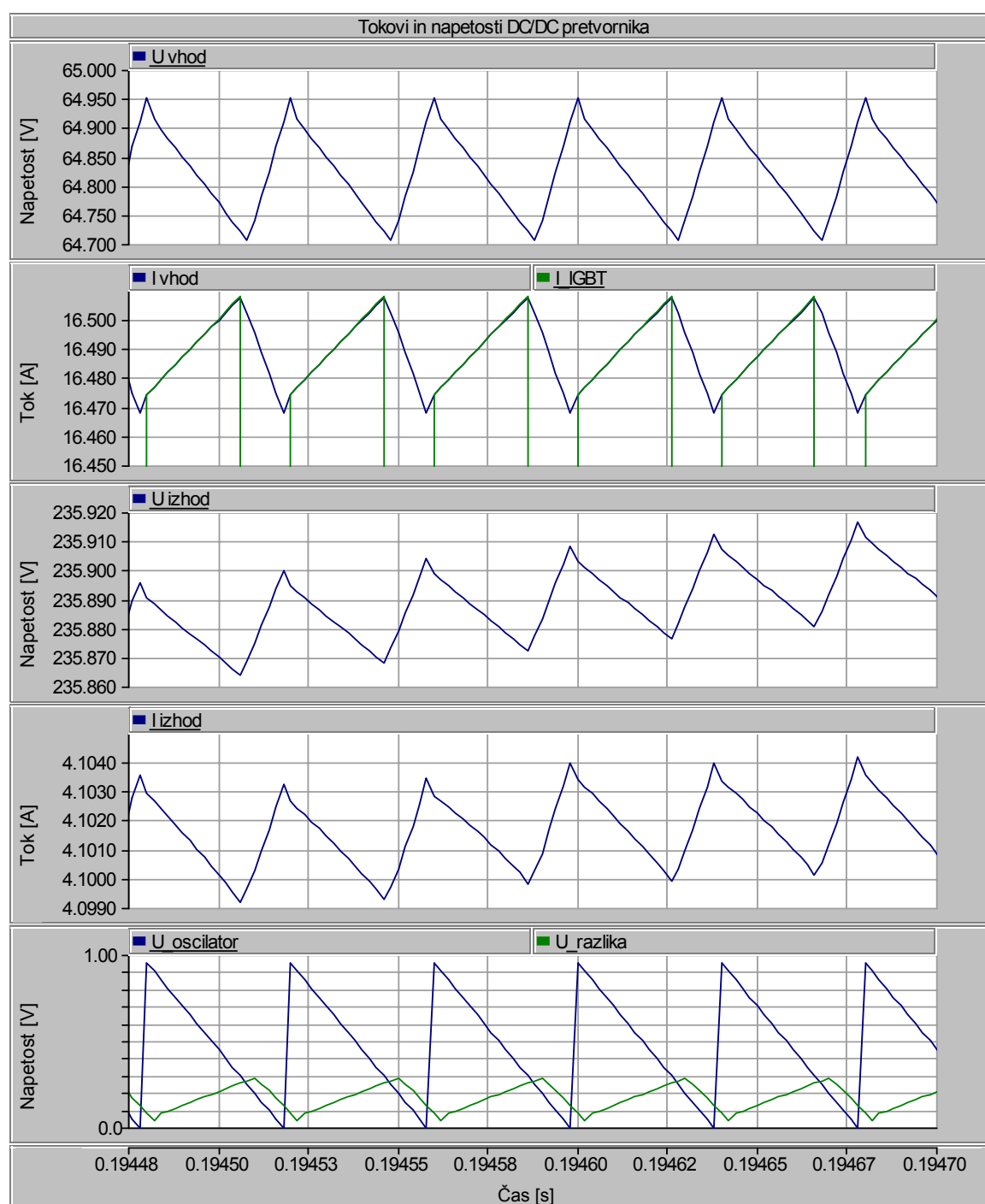
Sl. 4.8: Model sončne celice in DC/DC pretvornika s pulzno-širinsko modulacijo

Sončne celice so predstavljene kot tokovno odvisni napetostni vir s karakteristiko po sl. 4.6. Ob vsakem koraku digitalne simulacije se napetost vira določi glede na tok vira iz prejšnjega koraka. Ker nas zanima predvsem odziv sončnih celic na spremembo obremenitve – to je na spremembo toka, smo predpostavili konstantno sončno sevanje in konstantno temperaturo sončne celice. S tem je konstantna tudi optimalna obratovalna napetost sončne celice.

Izhod sončne celice je priključen na vhod DC/DC pretvornika. Večina obstoječih DC/DC pretvornikov, ki se uporabljajo v povezavi s sončnimi celicami, uporabljajo pulzno-širinsko modulacijo, ki ima relativno visok izkoristek in zaradi konstantne

preklopne frekvence ozek spekter šuma [17]. Zato smo tudi za naš model DC/DC pretvornika uporabili pulzno-širinsko modulacijo.

Na sl. 4.9 so prikazane posamezne veličine v DC/DC pretvorniku in regulacijskem vezju v stacionarnem stanju. Oznake v grafih se nanašajo na splošni model DC/DC pretvornika in regulacijskega vezja, ki sta prikazana na sl. 4.1 in sl. 4.4.



Sl. 4.9: Tokovi in napetosti v DC/DC pretvorniku in regulacijskem vezju v stacionarnem obratovanju sončnih celic

V enosmernem omrežju, ki ga naš model predstavlja, nazivna napetost znaša 230 V. Da dosežemo dovolj visoko vhodno napetost, na vhod DC/DC pretvornika priključimo glede na U/I karakteristiko po sl. 4.6 po dva zaporedno vezana sončna modula, katerih optimalna obratovalna napetost pri sončnem sevanju 1000 W/m^2 in temperaturi $25 \text{ }^\circ\text{C}$ znaša 68 V.

4.4 VETERNE TURBINE

4.4.1 Splošno o vetrnih turbinah

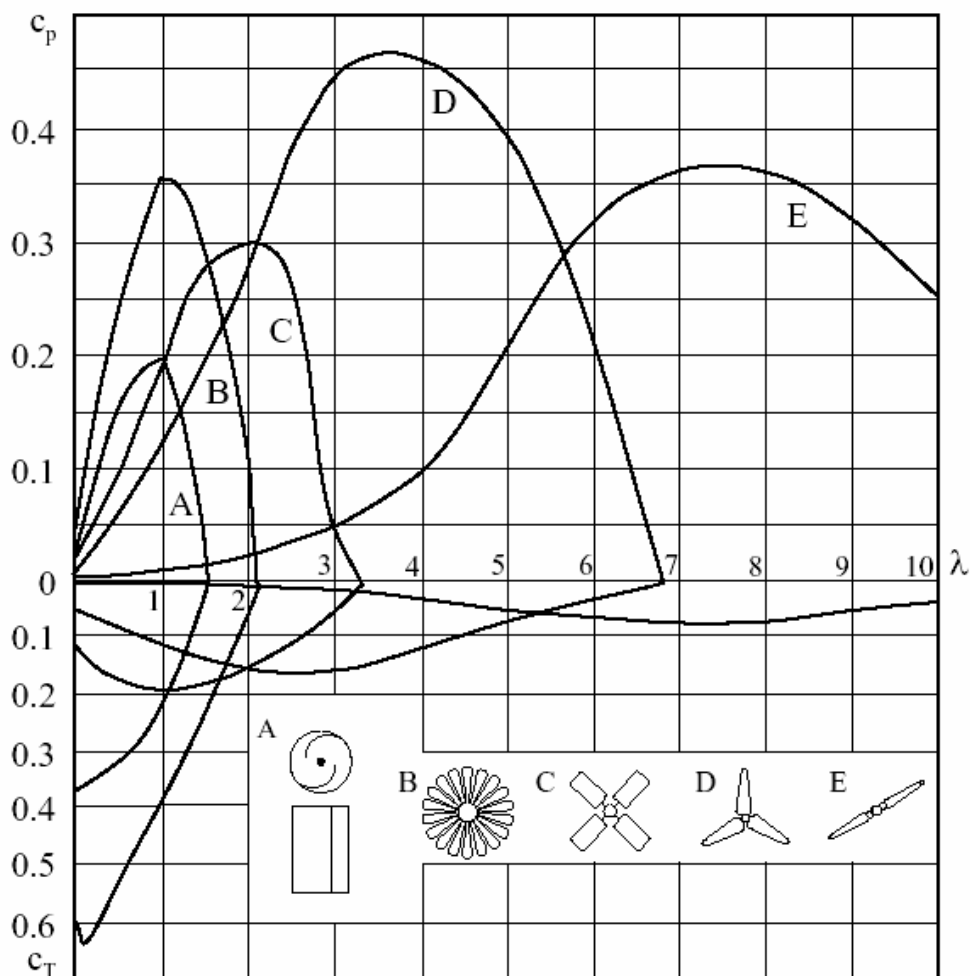
Veterne turbine pretvarjajo kinetično energijo vetra v električno. Pri tem lahko uporabljamo različne tipe rotorjev in različne tipe generatorjev.

Pri pretvorbi veterne energije v električno je za doseganje optimalne pretvorbe pomembno pravilno hitrostno število λ (angl. tip speed ratio), to je razmerje med obodno hitrostjo rotorja in hitrostjo vetra. To pomeni, da se mora hitrost vrtenja rotorja spreminjati glede na hitrost vetra, če hočemo doseči optimalen izkoristek. Po drugi strani pa za proizvodnjo električne energije največkrat rabimo povsem konstantno hitrost vrtenja generatorja, ki je priključen neposredno na izmenično omrežje frekvence 50 oz. 60 Hz. Veterne turbine s spremenljivo hitrostjo vrtenja proizvedejo od 10 do 25 % več električne energije kot veterne turbine enakih dimenzij s konstantno hitrostjo vrtenja. Ker je izdelava veterne turbine s spremenljivo hitrostjo vrtenja dražja, dobimo z veterne turbine s spremenljivo hitrostjo vrtenja za isto ceno le še od 3 do 10 % več električne energije [1].

Na sl. 4.10 so podani faktorji moči c_p in faktorji navora c_T v odvisnosti od hitrostnega števila λ , to je od razmerja med obodno hitrostjo rotorja in hitrostjo vetra. Faktor navora c_T je količnik med dejanskim navorom rotorja in nekim osnovnim navorom. Ta osnovni navor je definiran kot sila vetra, ki deluje na razdalji polmera rotorja na površino, ki jo opisuje rotor. Faktor moči c_p predstavlja delež moči, ki jo rotor pretvori iz moči vetra in je produkt faktorja navora c_T in hitrostnega števila λ .

Najpogosteje uporabljen tip rotorja je trilstni rotor s horizontalno osjo vrtenja, ki iz kinetične energije vetra pretvori največji del energije. Za črpanje vode, kjer so pri zagonu potrebni veliki momenti, so se v preteklosti pogosto uporabljali rotoji z velikim številom listov, ki imajo velik moment pri nizkih vrtljajih.

Pri povprečni hitrosti vetra 6 m/s nam veterna turbina s premerom rotorja 3.5 m da povprečno moč 300 W in približno 7 kWh električne energije na dan [19]. Pri tej povprečni hitrosti vetra je hitrost 12 m/s najvišja hitrost vetra, za katero so ponavadi grajeni generatorji in AC/DC pretvorniki obstoječih vetrnih turbin za hišno uporabo. Iz tega lahko sklepamo, da je izkoriščanje vetra do te največje hitrosti ekonomsko najbolj upravičeno. Pri tej največji hitrosti vetra 12 m/s nam veterna turbina s premerom rotorja 3.5 m daje moč 2500 W [21].

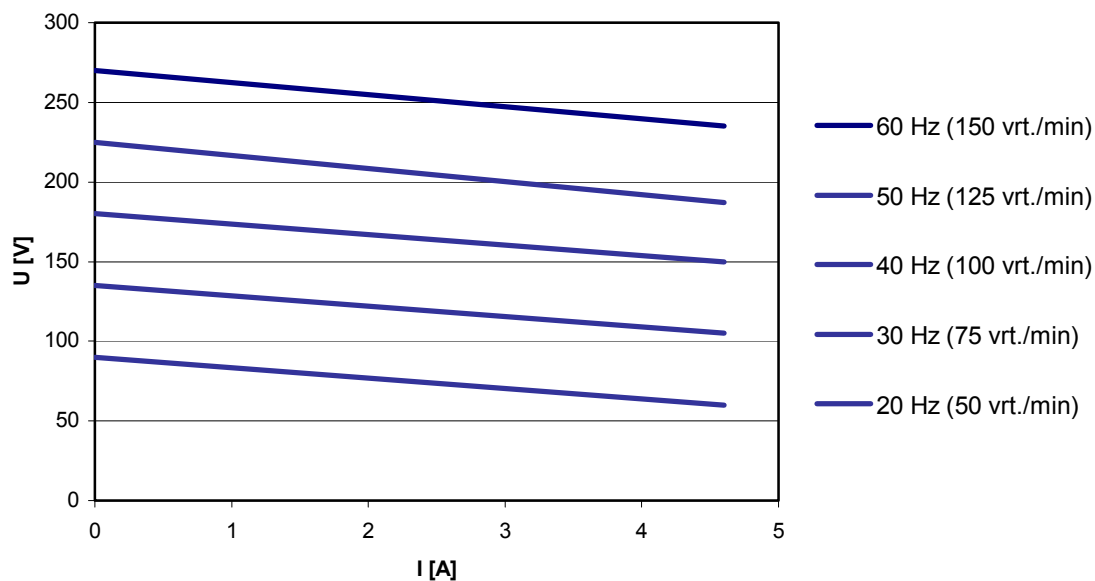


Sl. 4.10 Faktorji moči c_p in faktorji navora c_T v odvisnosti od hitrostnega števila λ za različne tipe rotorjev

4.4.2 Električni parametri vetrnih turbin

Večina hišnih vetrnih turbin – to so veterne turbine moči pod 20 kW – uporabljajo trifazne sinhronske generatorje s trajnimi magneti, predvsem zaradi visokega izkoristka in nezahtevnega vzdrževanja [19]. Izhodna napetost generatorja je izmenična, pri čemer je frekvenca odvisna od hitrosti vrtenja rotorja, ta pa od hitrosti vetra [13].

Rotor generatorja je pri hišnih vetrnih turbinah vpet na os rotorja neposredno, brez menjalnika, in se vrti z isto hitrostjo, ki se spreminja v odvisnosti od hitrosti vetra. Generirana električna napetost je izmenična, pri čemer je frekvenca odvisna od hitrosti vrtenja in števila polov generatorja. Zaradi nizke hitrosti vrenja rotorja je za doseganje uporabnih napetosti generatorja potrebno večje število polov. Na sl. 4.11 je podana U/I karakteristika 48-polnega generatorja s trajnimi magneti, obremenjenega z ohmskim bremenom, za različne hitrosti vrtenja rotorja [20].



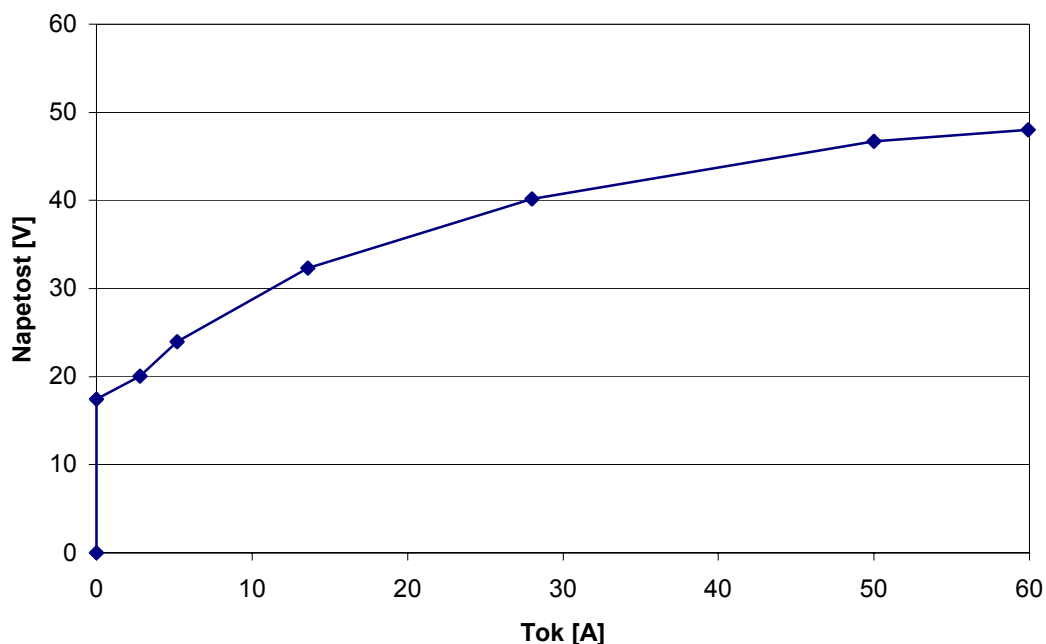
Sl. 4.11: U/I karakteristika generatorja s trajnimi magneti

Iz sl. 4.11 je razvidno, da je napetost odprtih sponk linearno odvisna od hitrosti vrtenja. Z naraščanjem toka se pri konstantni vrtilni hitrosti napetost linearno zmanjšuje predvsem kot posledica reakcije indukta [22].

4.4.3 Regulacija vetrnih turbin

Za doseganje optimalnega mehanskega izkoristka mora biti hitrost vrtenja rotorja veterne turbine sorazmerna hitrosti vetra, kar dosežemo z regulacijo toka generatorja. Hitrost vetra vpliva na moč turbine, hitrost vrtenja pa na frekvenco in amplitudo napetosti generatorja [24]. Tako lahko za vsako veterno turbino izdelamo diagram moči generatorja v odvisnosti od frekvence oz. napetosti za različne hitrosti vetra, kot v [23]. Za vsako hitrost vetra obstaja samo ena napetost, pri kateri generator daje največ moči. Iz tega lahko dobimo optimalno obratovalno U/I karakteristiko generatorja veterne turbine, ki je prikazana na sl. 4.12.

Optimalna U/I karakteristika velja za hitrosti vetra do nazivne hitrosti, za katero sta dimenzionirana generator in DC/DC pretvornik. Pri večjih hitrostih vetra se vrtljaji in s tem napetost generatorja lahko še povečujeta do najvišjih dovoljenih vrtljajev, tok generatorja pa se pri tem mora obratno sorazmerno manjšati tako, da je moč generatorja in DC/DC pretvornika konstantna. Ko so doseženi najvišji dovoljeni vrtljaji, lahko moč veterne turbine zmanjšamo tako, da smer veterne turbine izmaknemo iz smeri vetra ali pa veterno turbino zaustavimo.

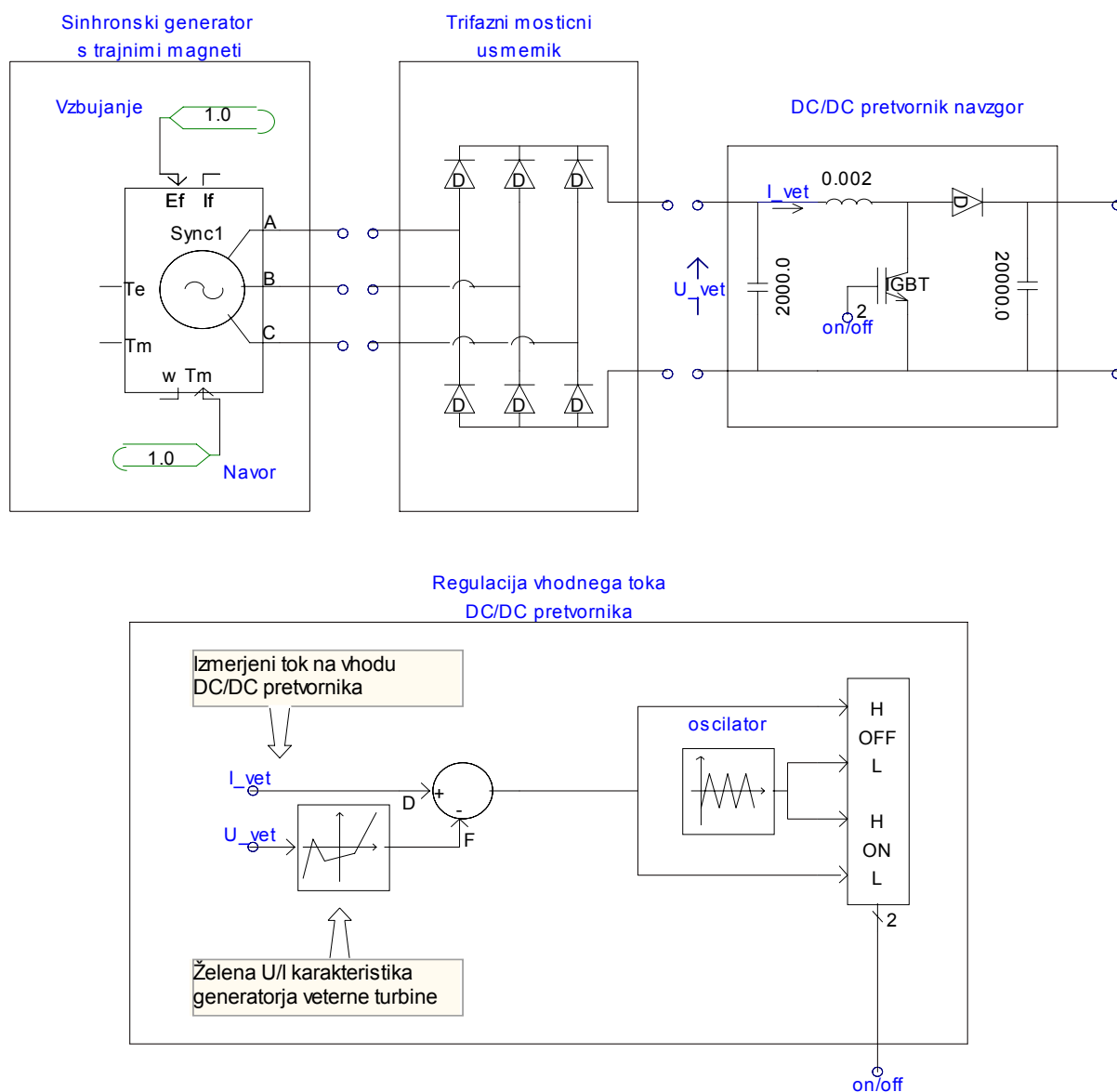


Sl. 4.12: Optimalna U/I karakteristika generatorja veterne turbine

Regulacija hitrosti vrtenja veterne turbine je v obravnavanem modelu omrežja izvedena z DC/DC pretvornikom, ki glede na vhodno napetost – to je napetost generatorja – regulira vhodni tok pretvornika po optimalni U/I karakteristiki. Generirana izhodna napetost na strani omrežja zagotovi pretok proizvedene energije v omrežje. Če omrežje ne more sprejeti vse proizvedene energije, se presežek proizvedene električne energije porabi na pomožnih porabnikih, to je na grelcih. Ti grelci se vklopijo na podlagi previsoke napetosti na izhodu DC/DC pretvornika.

4.4.4 Model veterne turbine in DC/DC pretvornika z regulacijo

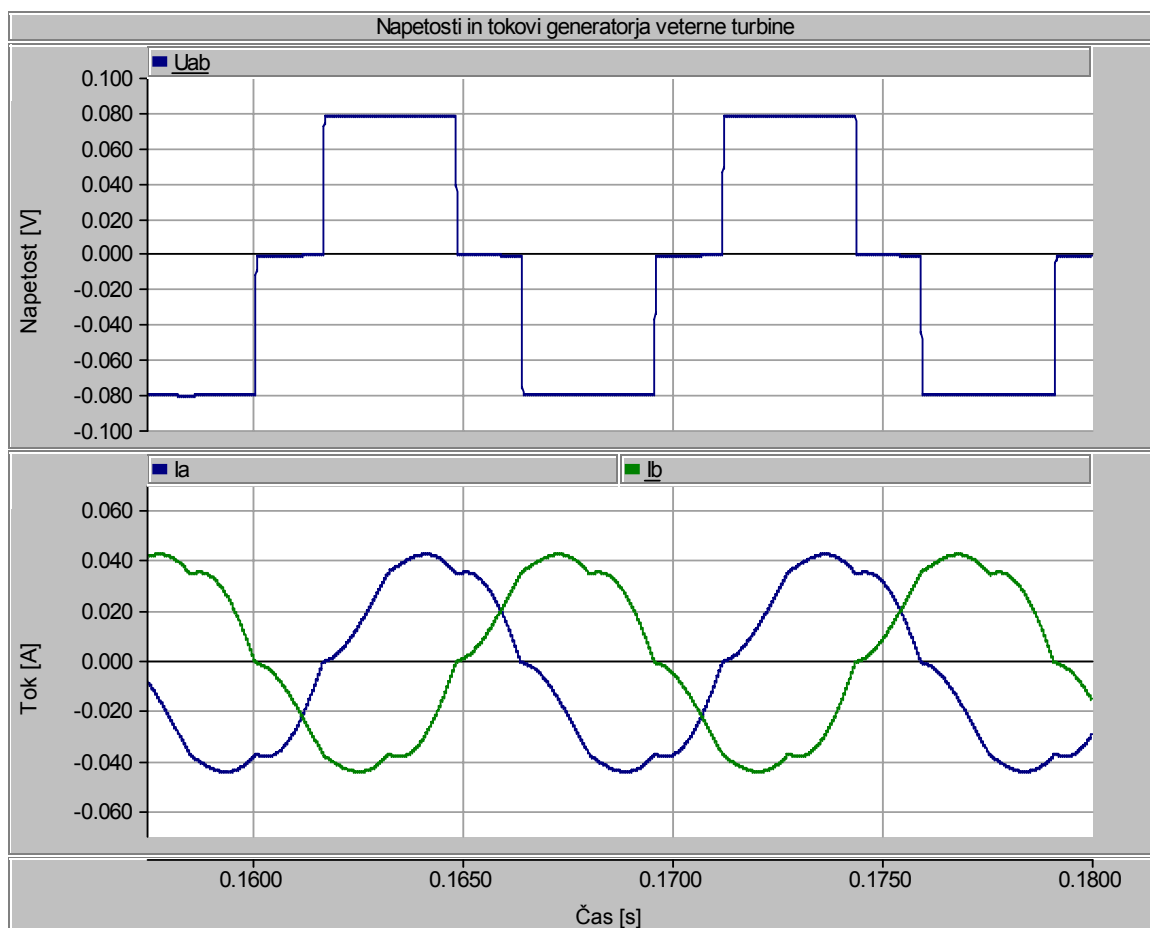
Za izvedbo digitalne simulacije enosmerne omrežja s programom PS CAD / EMTDC smo izdelali model veterne turbine. Vetrovno turbino predstavlja sinhronski generator s konstantnim vzbujanjem, ki ga zagotavljajo trajni magneti rotorja. Generatorju določamo navor, ki ga rotor veterne turbine prenaša na rotor generatorja. Ker nas zanima predvsem odziv veterne turbine na spremembo obremenitve – to je na spremembo toka, smo predpostavili konstantni navor. Ta poenostavitev lahko velja za simulacijo kratkih časovnih obdobij, ko se vrtilna hitrost ne spremeni bistveno. Zgradba modela veterne turbine, usmernika in DC/DC pretvornika s pulzno-širinsko modulacijo za program PS CAD / EMTDC je prikazana na sl. 4.13.



Sl. 4.13: Model veterne turbine, usmernika in DC/DC pretvornika z regulacijo

Trifazna izmenična napetost generatorja veterne turbine se usmeri z mostičnim usmernikom. Ta usmernik je sestavljen iz šestih diod in nima regulacije. Napetost generatorja med fazo a in b ter tokova teh dveh faz so prikazani na sl. 4.14. Kot je razvidno, vrednosti niso sinusne, kar je posledica tega, da je generator, ki ima določeno induktivnost, priključen na usmernik.

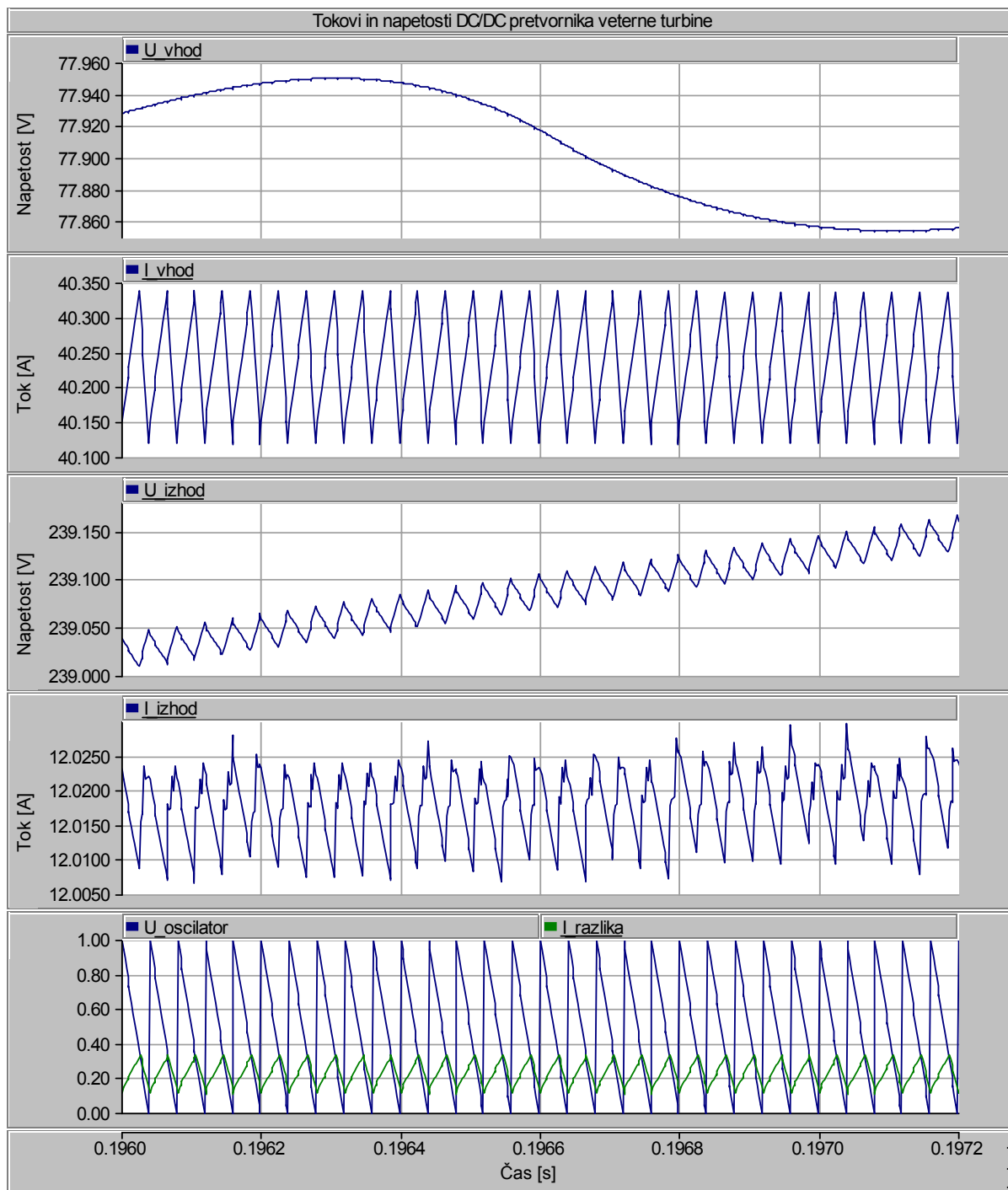
Usmerjena napetost je priključena na vhod DC/DC pretvornika. Model pretvornika je sestavljen enako kot v primeru pretvornika za sončne celice, s to razliko, da je na vходу pretvornika dodan kondenzator, ki zmanjšuje napetostne konice, ki so posledica induciranih napetosti v navitjih generatorja.



Sl. 4.14: Napetosti in tokovi generatorja veterne turbine, ki je priključen na usmernik

Za regulacijo je uporabljena pulzno-širinska modulacija, ki za razliko od regulacije pri sončnih celicah ne regulira vhodne napetosti ampak vhodni tok. Tako IGBT dobi signal za vklop ob dvigu napetosti na oscilatorju, signal za izklop pa dobi, ko tok na vhodu DC/DC pretvornika postane večji od željene vrednosti.

Razmere v DC/DC pretvorniku so prikazane na sl. 4.15. Oznake v grafih se nanašajo na splošni model DC/DC pretvornika in regulacijskega vezja, ki sta prikazana na sl. 4.1 in 4.4. Glede na sl. 4.9, ki prikazuje razmere v DC/DC pretvorniku sončnih celic, so pri veterni turbini razmere prikazane v nekajkrat daljšem časovnem obdobju, frekvenca obratovanja IGBT pa je enaka, to je 25 kHz. Kot je razvidno iz prvega grafa, vhodna napetost ne niha s frekvenco preklopov IGBT, ker je na vhodu DC/DC pretvornika kondenzator. Napetost na tem kondenzatorju niha s frekvenco, ki je enaka frekvenci generatorja veterne turbine. Iz tretjega grafa je razvidno, da se napetost na izhodu DC/DC pretvornika viša, kar pomeni, da stacionarno stanje še ni doseženo.



Sl. 4.15: Tokovi in napetosti v DC/DC pretvorniku in regulacijskem vezju veterne turbine

4.5 GORIVNE CELICE

4.5.1 Splošno o gorivnih celicah

Gorivne celice so hitro se razvijajoča tehnologija, vendar še vedno predraga za široko uporabo. Kot gorivo uporabljajo vodik, ki ga lahko pridobimo iz zemeljskega plina, naftnih derivatov ali drugih materialov, ki vsebujejo veliko vodika.

Princip delovanja je podoben delovanju akumulatorja, le da je za delovanje gorivne celice potreben stalni dovod goriva in kisika. Gorivo je lahko vodik, sintetični plin (mešanica vodika in CO₂), naravni plin ali metanol. Vrste gorivnih celic pogosto delimo po delovnih temperaturah, med seboj pa se razlikujejo predvsem po vrsti uporabljenega goriva, oksidacijskem sredstvu in materialu elektrod.

Skoraj vsi svetovni proizvajalci avtomobilov razvijajo gorivne celice in naprave za pogon avtomobilov z gorivnimi celicami. Zanimiva je njihova skupna ugotovitev, da je trenutno največja ovira za komercialno uporabo te tehnologije ustrezno skladiščenje vodika. Zato veliko vlagajo v razvoj tehnologije, ki omogoča proizvodnjo vodika iz metanola ali celo bencina. Čeprav mediji več pozornosti namenjajo uporabi gorivnih celic v avtomobilih, pa lahko pričakujemo, da bo veliko prej do komercialne uporabe gorivnih celic prišlo v proizvodnji električne energije. Razlog je predvsem v ceni gorivnih celic, ki je v tem segmentu energetike že sprejemljiva za tržišče. Trenutna cena motorjev z notranjim izgorevanjem znaša 30 do 40 \$/kW. Cene stacionarnih postrojev, kot so npr. plinski motorji, turbine in generatorji se gibljejo danes od približno 1000 do 1500 \$/kW [25].

4.5.2 Vrste gorivnih celic

Glede na zgradbo in način delovanja so v nadaljevanju opisane različne vrste gorivnih celic.

Gorivne celice s fosforjevo kislino (angl. phosphoric acid fuel cell – PAFC) so prve komercialno uporabljane gorivne celice. Preko 200 sistemov s takimi gorivnimi celicami je inštaliranih po svetu in sicer v bolnišnicah, hotelih, poslovnih stavbah, letališčih, itd. Temperatura delovanja gorivnih celic je približno 200°C. Gorivo je vodik, elektrolit pa je fosforjeva kislina. Izkoristek je med 40 in 45% [26, 27].

Gorivne celice z membrano, ki prepušča protone (angl. proton exchange membrane fuel cell – PEMFC) so nizkotemperaturne gorivne celice. Optimalna delovna temperatura je okrog 80°C. Zaradi možnosti hitrega zagona so predvidene za

uporabo v avtomobilih [28]. Elektrolit je membrana na osnovi ionske izmenjave, ki je ponavadi prekrita s platino. Izkoristek je okrog 40% [29].

Gorivne celice s staljenim karbonatom (angl. molten carbonate fuel cell – MCFC) uporabljajo kot elektrolit staljen karbonat – to je sol ogljikove kisline – in obratujejo pri temperaturi okrog 650°C. Taka temperatura je potrebna za zagotovitev prevodnosti elektrolita. MCFC so bile razvite za elektrarne, ki delujejo na zemeljski plin ali premog. Izkoristek je med 50 in 60 %, pri soproizvodnji toplote pa do 85 % [29].

Gorivne celice s keramičnim elektrolitom (angl. solid oxide fuel cell – SOFC) imajo vse komponente v trdni obliki. Njihova prednost je trdni elektrolit, saj so tekoči elektroliti nagnjeni h koroziji in jih je težko nadzorovati. Trdna oblika komponent celice omogoča izbiro različnih oblik celice. Delovna temperatura je okrog 1000°C. Visoke obratovalne temperature omogočajo pridobivanje vodika iz ogljikovodikovih goriv znotraj gorivne celice [30]. Izkoristek je zelo podoben tistemu pri gorivnih celicah s staljenim karbonatom [29].

Alkalne gorivne celice (angl. alkaline fuel cell – AFC) imajo zelo visok izkoristek – nad 70 %. Kot elektrolit uporabljajo kalijev hidroksid KOH. Zaradi visoke cene trenutno niso primerne za širšo uporabo, uporabljajo pa se v vesoljskih projektih [31].

Delovne temperature in izkoristki različnih vrst gorivnih celic so prikazane v tabeli III.

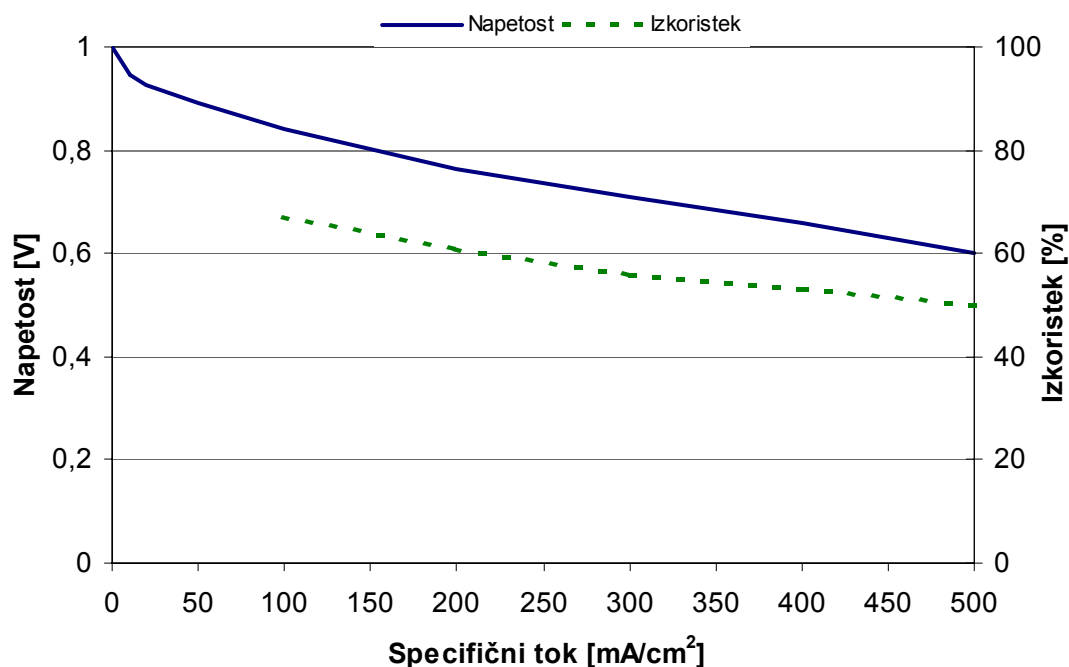
Tabela III: Delovne temperature in izkoristki različnih tipov gorivnih celic

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	AFC
Temperatura	80°C	200°C	650°C	1000°C	100°C
Izkoristek	< 40%	40 - 45%	50 - 60%	50 - 60%	> 70%

4.5.3 Električni parametri gorivnih celic

Gorivne celice proizvajajo enosmerno napetost, ki je tokovno odvisna. Obratovalna napetost je pri največji delovni moči glede na tip celice od 25 % do 60 % nižja kot napetost odprtih sponk [32, 33]. To pomeni, da neposredna priključitev na enosmerno omrežje s konstantno napetostjo ni možna. Za pretok moči v omrežje tako potrebujemo DC/DC pretvornik z ustrežno regulacijo.

Napetost gorivne celice je odvisna od toka oz. moči, pri kateri obratuje. U/I karakteristika in izkoristek za primer PEMFC gorivne celice sta prikazana na sl. 4.16 [33, 34].



Sl. 4.16: U/I karakteristika gorivne celice

Dinamični odziv na skočne spremembe obremenitve gorivne celice je reda 0.1 s, odvisno od tipa celice in velikosti spremembe obremenitve [35, 36, 37], v posebnih izvedbah tudi manj – reda 0.01 s [38]. Za obravnavani model omrežja je predvideno obratovanje gorivne celice pri relativno konstantni moči – hitre spremembe porabe in proizvodnje zagotavlja akumulator. Gorivne celice obratujejo glede na potrebe po toploti, ob izpraznjenju akumulatorjev pa se uporabijo za napolnjenje le-teh. Gorivne celice lahko spreminjajo razmerje med proizvedeno električno energijo in toploto ter se tako lahko prilagajajo potrebam po električni energiji.

4.5.4 Regulacija gorivnih celic

Regulacija gorivnih celic obsega poleg regulacije toka in napetosti tudi mehansko regulacijo dotoka vodika in regulacijo ostalih parametrov, kot so npr. temperatura, stanje elektrolita, itd. Pri obravnavi priklopa gorivnih celic na obravnavano enosmerno izolirano omrežje nas zanima predvsem regulacija toka in napetosti, ki jo dosežemo z DC/DC pretvornikom. Tok gorivnih celic je določen tako, da je proizvedena moč največja. Ta tok je za določene parametre gorivne celice konstanten. Tako DC/DC pretvornik regulira konstanten tok na svojem vhodu, tok in

napetost na izhodu pa se vzpostavi samodejno na tako vrednost, da proizvedena moč teče preko omrežja do porabnikov oz. v akumulator.

Ker preveliki tokovi gorivne celice lahko poškodujejo, mora pretvornik take tokove preprečiti[39].

Če omrežje ne more sprejeti vse proizvedene energije gorivnih celic, se to odraža na prevelikem dvigu izhodne napetosti. V tem primeru mora DC/DC pretvornik znižati vhodni tok – to je tok gorivnih celic – do take meje, da največja dovoljena napetost na izhodu DC/DC pretvornika ni presežena.

Poleg tega se gorivne celice vklopi, če se napetost omrežja zniža pod minimalno dovoljeno vrednost. Taka napetost se pojavi ob največji dovoljeni izpraznitvi akumulatorja. V tem primeru gorivna celica v nekajurnem obratovanju napolni akumulator. Ko je akumulator poln, napetost omrežja naraste na največjo dovoljeno napetost, kar je informacija za izklop gorivne celice oz. njen odklop od omrežja.

V primeru, da gorivne celice porabnikom ne zagotovijo zadostne moči, bi se pri konstantni vhodni napetosti izhodna napetost znižala pod najmanjšo dovoljeno napetost. Ker taka napetost ni dopustna, se gorivne celice odklopijo od omrežja. Do takega stanja pri normalnih pogojih obratovanje ne pride, saj je potrebna moč porabnikov zagotovljena iz akumulatorja. V primeru izpada akumulatorja, npr. ob izklopu zaradi kratkega stika, pa je znižanje napetosti možno, zato mora DC/DC pretvornik v tem primeru gorivno celico odklopiti od omrežja.

4.5.5 Model gorivnih celic in DC/DC pretvornika z regulacijo

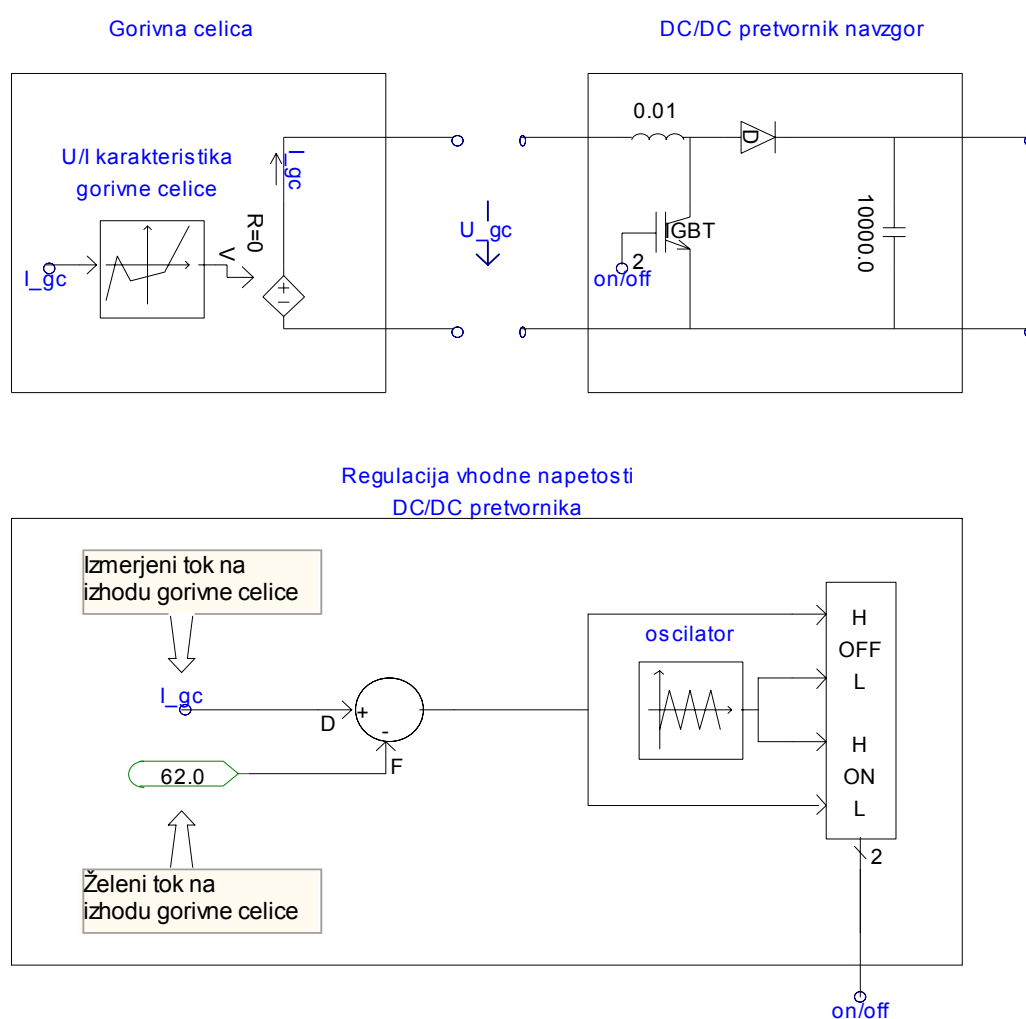
Za izvedbo digitalne simulacije enosmerne omrežja s programom PS CAD / EMTDC je bil izdelan model gorivne celice in DC/DC pretvornika. Gorivne celice so predstavljene kot tokovno odvisni napetostni vir s karakteristiko po sl. 4.16. Ob vsakem koraku digitalne simulacije se napetost vira določi glede na tok vira iz prejšnjega koraka. Predpostavili smo konstantno moč in s tem konstanten tok gorivne celice v normalnem obratovanju.

Izhod gorivnih celic je priključen na vhod DC/DC pretvornika. Model pretvornika je sestavljen na enak način kot v primeru priklopa sončnih celic. Uporabljena je pulzno-širinska modulacija. IGBT se vklaplja s konstantno frekvenco in prevaja do takrat, ko tok na vhodu – to je tok gorivnih celic – naraste nad želeno vrednost.

Če hočemo doseči razmerje med izhodno in vhodno napetostjo DC/DC pretvornika okrog 4, potrebujemo za izhodno napetost okrog 230 V na vhodu napetost vsaj

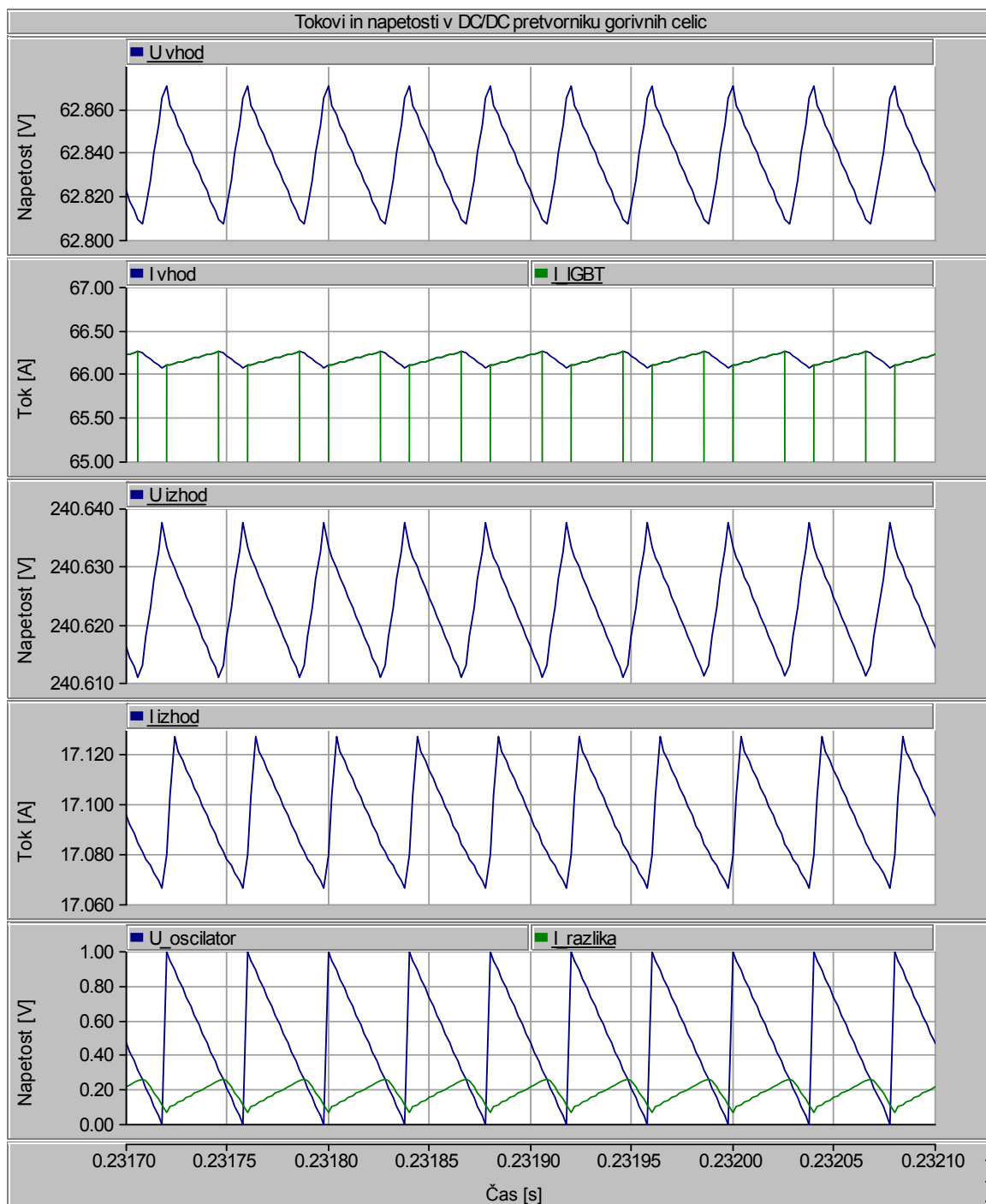
okrog 60 V. Da dosežemo dovolj visoko vhodno napetost, na vhod pretvornika priključimo glede na U/I karakteristiko po sl. 4.16 okrog 100 zaporedno vezanih gorivnih celic. Pri površini gorivne celice 100 cm² tak sklad gorivnih celic proizvaja pri toku 50 A 3 kW električne energije.

Zgradba modela sončne celice in DC/DC pretvornika s pulzno-širinsko modulacijo za program PS CAD / EMTDC je prikazana na sl. 4.17. Regulacijsko vezje primerja razliko dejanskega in želenega toka na vhodu DC/DC pretvornika z žagasto napetostjo oscilatorja. Podobno kot pri veterni turbini dobi IGBT signal za vklop ob dvigu napetosti na oscilatorju, signal za izklop pa dobi, ko tok na vhodu DC/DC pretvornika postane večji od željene vrednosti.



Sl. 4.17: Model gorivne celice in DC/DC pretvornika s pulzno-širinsko modulacijo

Razmere v DC/DC pretvorniku so prikazane na sl. 4.18. Oznake v grafih se nanašajo na splošni model DC/DC pretvornika in regulacijskega vezja, ki sta prikazana na sl. 4.1 in sl. 4.4. Kot je razvidno iz grafov, napetosti in tokovi nihajo s frekvenco preklopov IGBT, to je 25 kHz.



Sl. 4.18: Tokovi in napetosti v DC/DC pretvorniku in regulacijskem vezju gorivnih celic

4.6 MIKRO-HIDROELEKTRARNE

Uporaba mikro-hidroelektrarn je pogojena z obstojem vodnih virov z zadostnim pretokom in zadostnim padcem vode. Ker mikro-hidroelektrarne pod 1 kW ponavadi nimajo regulacije pretoka vode, jih moramo dimenzionirati za najmanjši možni pretok vode, v primeru večjih pretokov pa vodo prelivajo. Nekatere mikro-hidroelektrarne moči nad 1 kW imajo tudi regulacijo pretoka vode [45, 46, 47]

Za proizvodnjo 7 kWh električne energije rabimo mikro-hidroelektrarno, ki deluje 24 ur na dan pri konstantni moči 300 W. Ker obratuje pri konstantni moči, rabimo glede na veterno turbino za isto povprečno proizvedeno energijo skoraj 10-krat manjšo moč mikro-hidroelektrarne. Ta ugotovitev izhaja iz dejstva, da veterna turbina, ki pri povprečni hitrosti vetra 6 m/s proizvede povprečno 7 kWh na dan, mora za optimalno izrabo pretvarjati energijo vetra do hitrosti vetra 12 m/s, pri kateri proizvaja moč 2500 W.

Za napajanje 300 W mikro-hidroelektrarne z izkoristkom 50 % rabimo pretok 6 l/s pri padcu 10 m ali pretok 3 l/s pri padcu 20 m, itn.

Nekaj mikro-hidroelektrarn je na voljo na tržišču. Cena enote, ki vsebuje peltonovo turbino in sinhronski generator s trajnimi magneti, je okrog 2000 \$ za moč 2.5 kW [49]. Dimenzija take enote je manjša od 1 m³. Modeli, ki niso namenjeni priklopu na izmenično omrežje, kot generator uporabljajo sinhronske generatorje s trajnimi magneti [47, 50], podobno kot veterne turbine, zato bi regulacija lahko potekala na podoben način kot pri veternih turbinah. Prav tako je potrebno presežek energije odvajati na pomožne porabnike ali pa zaustaviti proizvodnjo električne energije [48].

V obravnavani model enosmernega omrežja mikro-hidroelektrarna ni vključena in je v magistrsko delo vključena le informativno.

5. AKUMULACIJA ENERGIJE

Akumulacija energije ima v otočnem obratovanju omrežja z razpršeno proizvodnjo ključno vlogo, kajti proizvodnja in poraba električne energije se časovno ne ujemata. Obstajajo različni tipi akumulacije kot npr. različni tipi akumulatorjev (svinčeni, Ni-Cd, NiMH, alkalni, Li-Ion). V razvoju so še Na-S akumulatorji ter super-kondenzatorji. Poleg pretvorbe električne energije v kemično, jo lahko pretvorimo tudi v kinetično energijo rotirajočih mas (angl. fly-wheels). Ta tehnologija je že razvita, ni pa še dokončno dodelana. Naslednji način je shranjevanje v obliki elektromagnetne energije v superprevodnih tuljavah, kar pa je še vedno predmet raziskav in to le za večje sisteme nad 500 kWh. Ena od možnih variant akumulacije je tudi reverzibilno delovanje gorivne celice, ki energijo shranjujejo v obliki vodika [1].

5.1 AKUMULATORJI

Glede na ceno so svinčevi akumulatorji še vedno najboljša izbira za akumulacijo električne energije pri stacionarni uporabi. Čeprav je njihova specifična kapaciteta – to razmerje med kapaciteto in volumnom – in specifična moč – to je razmerje med močjo in volumnom – v primerjavi s drugimi tipi akumulatorjev od 2 do 4-krat manjša, so za stacionarno uporabo najpogosteje uporabljeni. Njihova cena na enoto kapacitete je namreč 3 do 5-krat manjša od ostalih tipov akumulatorjev, poleg tega imajo visok izkoristek – to je delež energije, ki ga dobimo iz akumulatorja glede na dovedeno energijo [1]. Če imamo v omrežje vključene tudi diesel agregate ali gorivne celice, se lahko potrebna akumulacija zmanjša, saj se ti viri prilagajajo potrebam porabnikov.

V obravnavanem modelu omrežja so za akumulacijo električne energije uporabljeni svinčevi akumulatorji, ki so cenovno najboljša izbira.

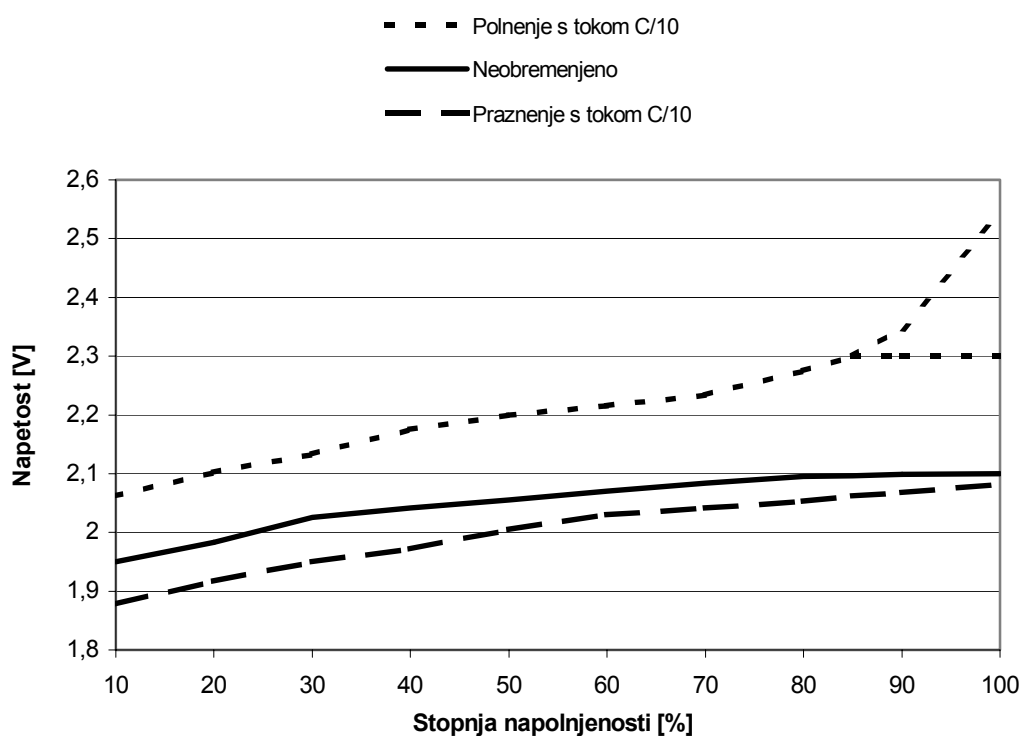
5.2 ELEKTRIČNI PARAMETRI SVINČEVIH AKUMULATORJEV

V obravnavanem primeru, ki obsega napajanje treh stanovanjskih hiš, je predvidena akumulacija v obsegu enodnevne povprečne porabe vseh treh hiš, to je okrog 30 kWh, upoštevajoč izkoristek akumulacije 90 % [1] ter najvišje dovoljeno izpraznenje 80 % [40]. Ker je pri napajanju omrežja akumulator priključen neposredno na omrežje, moramo zaradi nihaja napetosti na akumulatorju v odvisnosti od toka kapaciteto akumulatorja izbrati tako, da se pri največjem možnem toku napetost ne bi zmanjšala za več kot 10 %. Glede na karakteristiko po sl. 5.1 to pomeni, da največji možni tok praznenja akumulatorja, izražen v amperih, ne sme biti večji od 1/10 kapacitete akumulatorja, izražene v amper-urah, če želimo, da se

napetost na sponkah akumulatorja pri 80 % izpraznjenju in največjem možnem toku ne bo znižala za več kot 10 %. Zato je potrebno akumulacijo povečati na 75 kWh.

Sl. 5.1 prikazuje napetost svinčevega akumulatorja v odvisnosti od stopnje napolnjenosti za primer neobremenjenega stanja ter polnjenja in praznjenja s tokom $C/10$. Tok $C/10$ je tok, pri katerem se akumulator izprazni do dovoljene meje v desetih urah. Kot je razvidno iz sl. 5.1, je razlika med najvišjo in najnižjo napetostjo okrog 40 %, vendar se le-ta lahko zniža na okrog 25 %, če pri napolnjenosti nad 85 % polnimo z manjšim tokom pri konstantni napetosti 2.3 V na celico [40, 41].

Napetostna karakteristika ostalih tipov akumulatorjev je precej podobna karakteristiki svinčevega akumulatorja, s tem, da je nihanje napetosti glede na stopnjo napolnjenosti nekoliko večje [42, 43, 44].

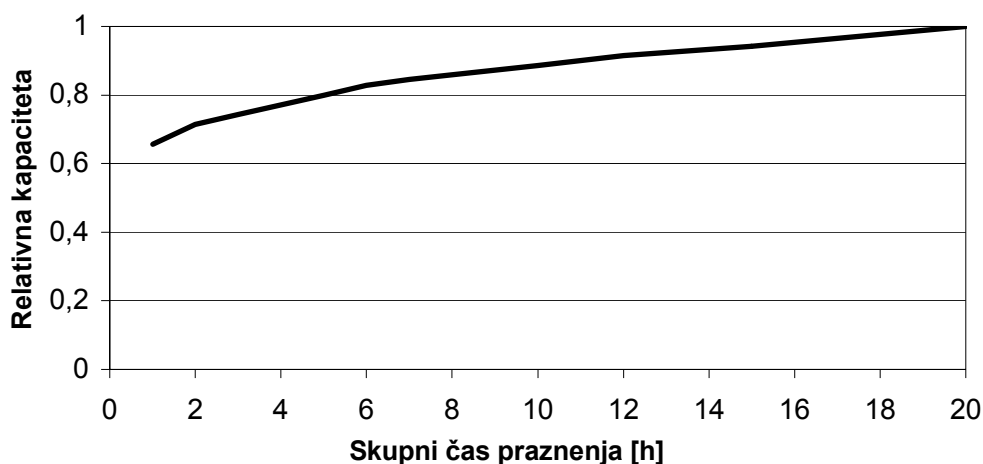


Sl. 5.1: Napetost celice svinčevega akumulatorja v odvisnosti od stopnje napolnjenosti

Tudi kapaciteta je odvisna od hitrosti praznjenja. Čim hitreje se akumulator prazni, tem manj energije dobimo iz njega. Kapaciteta v odvisnosti od hitrosti praznjenja je prikazana na sl. 5.2 [41].

Zaradi slabšega izkoristka načeloma akumulatorja naj ne bi praznili z večjim tokom kot je desetina celotne kapacitete – torej s takim tokom, da bi se izpraznil v desetih urah. V obravnavanem primeru je največji tok kratkotrajen - ocenjen na 12 minut, zato bi lahko dopustili, da bi bil tok nekajkrat večji od priporočljivega. Pri tem bi

se izgube povečale le za par procentov, akumulator pa bi bil manjši in s tem cenejši. Ker je pri tem padec napetosti na akumulatorju večji, bi ta način prišel v poštev v primeru, če bi akumulator tudi pri napajanju omrežja priključili preko DC/DC pretvornika.



Sl. 5.2 Kapaciteta akumulatorja v odvisnosti od hitrosti praznenja

5.3 REGULACIJA AKUMULATORJEV

Poleg akumulacije električne energije skrbi akumulator tudi za napetost omrežja. V manjših omrežjih, kjer akumulator napaja le nekaj napetostno precej neobčutljivih porabnikov, je akumulator lahko priklopljen neposredno na omrežje. Napetost v takem omrežju je odvisna od stopnje napolnjenosti akumulatorja ter od tega, ali se akumulator prazni ali polni.

V obravnavanem omrežju je predviden priklop akumulatorja v eni sami točki, kar pomeni, da je potrebno razliki med najnižjo in najvišjo napetostjo akumulatorja prišteti še padec napetosti na vodnikih med akumulatorjem in porabnikom. V primeru neposrednega priklopa akumulatorja bi napetost pri najbolj oddaljenemu porabniku odstopala od nazivne napetosti za $\pm 25\%$, kar je več kot je na primer dovoljeno odstopanje napetosti v obstoječem nizkonapetostnem izmeničnem omrežju, kjer le-to znaša $\pm 10\%$.

Za priklop akumulatorja na omrežje je možnih več načinov. Če je omrežje izmenično, rabimo za napajanje omrežja DC/AC razsmernik in za polnjenje akumulatora AC/DC pretvornik – to je polnilec.

V primeru enosmerne omrežja je možnih več načinov priklopa:

1. Za napajanje omrežja se uporabi DC/DC pretvornik, za polnjenje akumulatorjev pa DC/DC pretvornik – polnilec. Možna bi bila uporaba samo enega DC/DC pretvornika, ki bi imel možnost prenašanja energije v obe smeri. V točki priklopa akumulatorja tako lahko vzpostavimo konstantno napetost. Napetost omrežja v različnih točkah je s tem odvisna le od padca napetosti na vodnikih.

2. Akumulator se pri napajanju omrežja priključi neposredno na omrežje, pri polnjenju pa se uporabi DC/DC pretvornik – polnilec. Pri tem načinu napetost v točki priklopa akumulatorja niha za $\pm 5\%$. Če hočemo doseči enake napetostne razmere kot v primeru 1, moramo zmanjšati napetostne padce na vodnikih, kar pomeni večje preseke vodnikov.

3. Akumulator je tako pri napajanju omrežja kot pri polnjenju priključen neposredno na omrežje. Pri tem napetost v točki priklopa akumulatorja niha za $\pm 15\%$. Če temu dodamo še $\pm 10\%$ padca napetosti na vodnikih, dobimo $\pm 25\%$ nihanje napetosti omrežja. V tem primeru bi za večino porabnikov potrebovali DC/DC ali DC/AC pretvornike, kar pomeni dodatne stroške. Dobra stran priključitve porabnikov preko DC/AC pretvornikov je v enostavnosti priključitve vseh standardnih električnih naprav.

V obravnavanem modelu omrežja smo predpostavili priklop akumulatorja na omrežje po načinu 2, torej se akumulator pri napajanju omrežja priključi neposredno, pri polnjenju pa se uporabi DC/DC pretvornik – polnilec.

Naloga DC/DC pretvornika – polnilca – je, da pri presežku proizvedene električne energije vzdrži v točki priklopa konstantno napetost omrežja. To dosežemo z ustreznim odvzemanjem energije iz omrežja. Poleg tega mora pretvornik skrbeti za pravilno polnjenje akumulatorja, da se le-ta ne poškoduje zaradi prenapolnjenja ali prevelikih tokov. Pri polnjenju je potrebno regulirati tok, ki ne sme preseči dovoljene vrednosti glede na stopnjo napoljenosti. Tok je omejen predvsem zaradi segrevanja akumulatorja. Če polnilec kontrolira tudi temperaturo akumulatorja, se lahko tok polnjenja poveča. Ko je akumulator poln, proizvodnja električne energije pa večja od porabe, napetost omrežja narašča do najvišje dovoljene napetosti, kar je posledica dviga napetosti na izhodih DC/DC pretvornikov pri virih. Ko je dosežena najvišja dovoljena napetost, je potrebno zmanjšati proizvodnjo ali pa energijo porabiti na pomožnih porabnikih, vendar to ni več skrb DC/DC pretvornika akumulatorja. Zvišana napetost v točki priklopa akumulatorja je lahko tudi podatek za vklop bremen, ki niso časovno pogojena, npr. črpanje vode, zalivanje, ogrevanje,

itd, in se vključijo le takrat, ko je proizvodnja električne energije večja od porabe, akumulator pa poln.

Omejen mora biti tudi tok praznenja akumulatorja, ko je akumulator neposredno priključen na omrežje. To pomeni, da mora biti velikost akumulatorja pravilno izbrana, da pri največji porabi ta tok ni presežen. Kljub pravilnemu dimenzioniranju akumulatorja ga je smiselno ščititi pred prevelikim tokom, kar obenem pomeni zaščito proti kratkemu stiku.

Ker je akumulator pri napajanju omrežja neposredno priključen na omrežje enosmerne nazivne napetosti 230 V, potrebujemo zaporedno vezavo 114 svinčevih celic oz. 19 akumulatorjev s šestimi celicami, katerih napetost pri polni napolnjenosti in neobremenjenem stanju znaša 239.5 V.

5.4 MODEL AKUMULATORJA

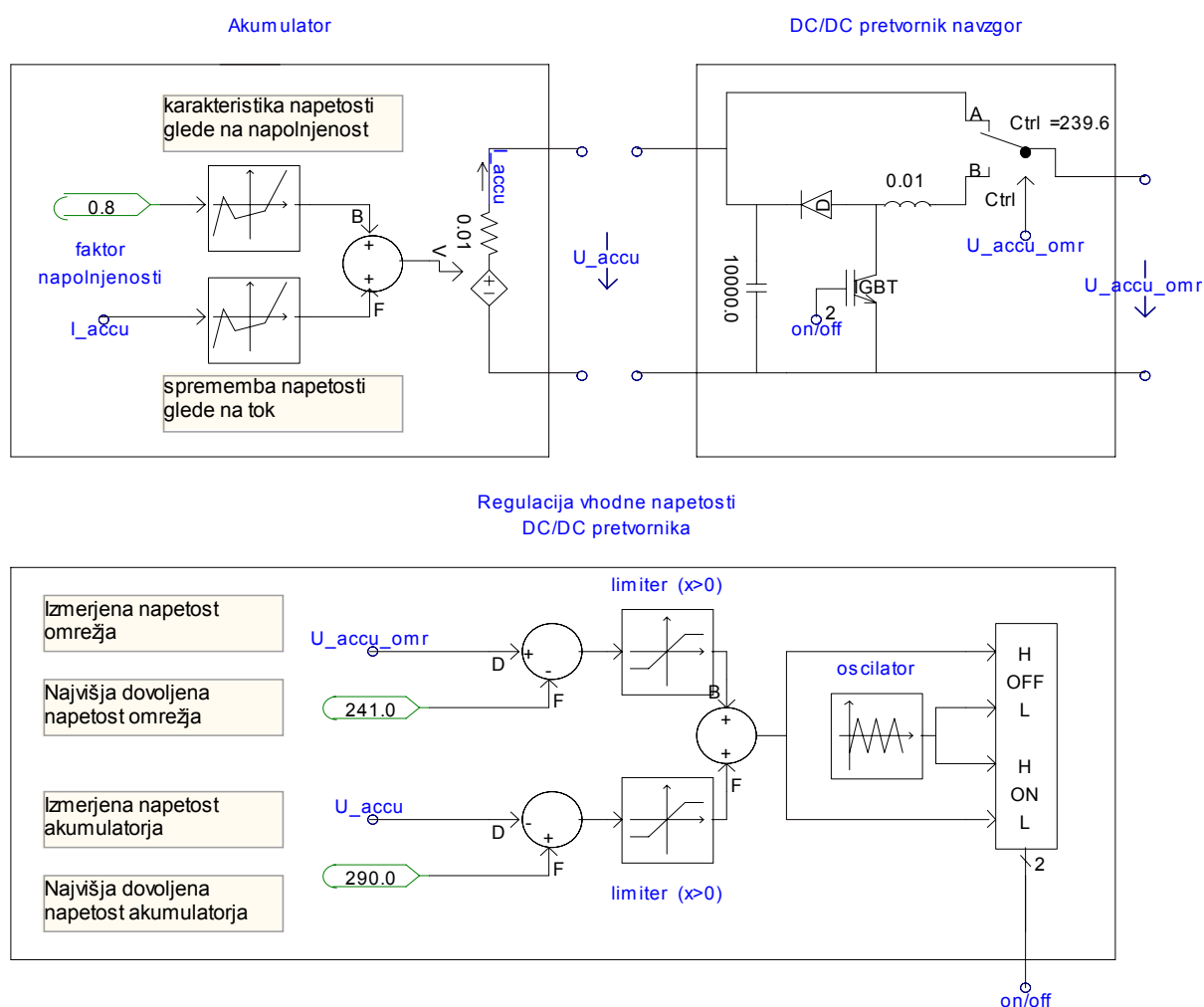
Akumulator je predstavljen kot napetostni vir, katerega napetost je odvisna od toka in od napolnjenosti akumulatorja. Ker se napolnjenost spreminja zelo počasi glede na prehodne pojave, ki jih opazujemo, je v modelu definirana kot konstantna vrednost.

DC/DC pretvornik ima stikalo, ki glede na napetost omrežja preklaplja med napajanjem omrežja in polnjenjem akumulatorja. Dokler omrežje obratuje pri napetosti, ki je nižja od napetosti povsem napolnjenega in neobremenjenega akumulatorja, to je 239 V, je vklopljeno napajanje omrežja. Ko napetost omrežja preseže 239 V, pomeni, da akumulator omrežja ne more več napajati, zato stikalo DC/DC pretvornika preklopi na polnjenje akumulatorja. Če je proizvodnja večja od porabe, napetost še narašča in pri 240 V začne DC/DC pretvornik polniti akumulator s tako močjo, da je napetost omrežja konstantno 240 V. Za preprečitev prenapolnjenosti akumulatorja je dodana dodatna regulacija, ki omejuje napetost akumulatorja. To pomeni, da v primeru, ko je akumulator poln in s tem dosežena najvišja dovoljena napetost akumulatorja, DC/DC pretvornik zmanjša polnjenje in s tem napetost omrežja naraste, če je le proizvodnja večja od porabe. Napetost se zviša v celotnem omrežju in jo zaznajo tudi DC/DC pretvorniki posameznih proizvodnih enot, ki glede na to zmanjšajo proizvodnjo ali pa odvajajo energijo na pomožne porabnike.

Uporabljena je regulacija s pulzno-širinsko modulacijo. Podobno kot pri ostalih DC/DC prevornikih, oscilator proizvaja napetost žagaste oblike s hitrim dvigom in počasnim padanjem napetosti. Ta napetost se primerja z dvema veličinama. Prva je razlika med izmerjeno in želeno napetostjo omrežja in predstavlja regulacijo

napetosti omrežja, druga pa je razlika med izmerjeno in želeno vrednostjo napetosti akumulatorja, ki predstavlja zaščito pred prenapolnjenostjo. Obe veličini sta omejeni z limiterjem, ki dovoljujeta le pozitivne razlike obeh reguliranih veličin in s tem preprečujeta medsebojne vplive.

Zgradba modela akumulatorja in DC/DC pretvornika skupaj z regulacijo za program PS CAD / EMTDC je prikazana na sl. 5.3.



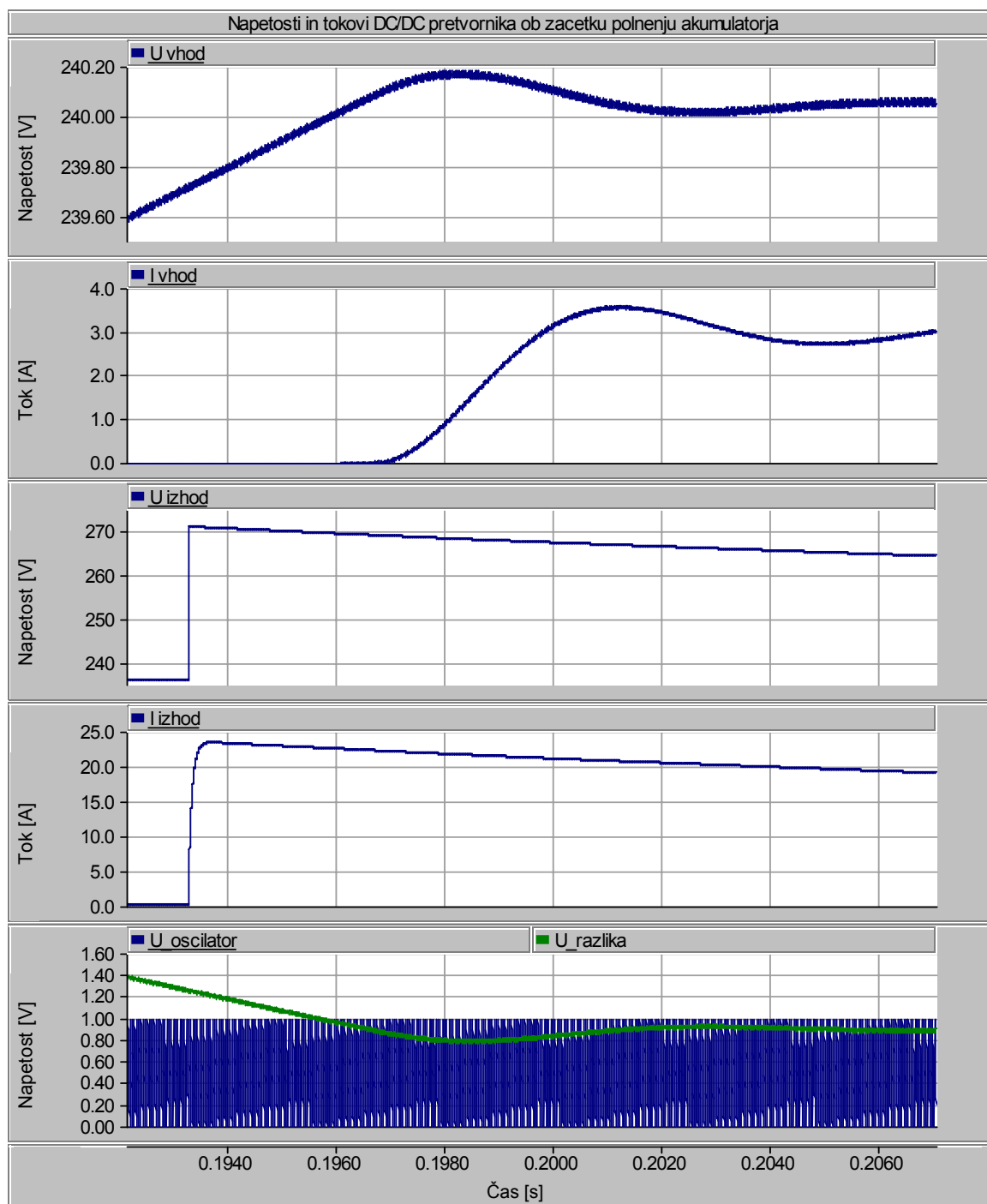
Sl. 5.3: Model akumulatorja in DC/DC pretvornika z regulacijo

Razmere v DC/DC pretvorniku so prikazane na sl. 5.4. Oznake v grafih se nanašajo na splošni model DC/DC pretvornika in regulacijskega vezja, ki sta prikazana na sl. 4.1 in sl. 4.4. Iz posameznih grafov je razvidno naslednje:

1. Vhodna napetost DC/DC pretvornika je napetost omrežja. Ta napetost narašča do napetosti 240 V, pri kateri DC/DC pretvornik začne delovati z vklapljanjem in izklapljanjem IGBT. Napetost se ustali pri 240.2 V. Razlika med to napetostjo in želeno napetostjo znaša 0.8 V, kar je razvidno tudi iz zadnjega grafa.

2. Vhodni tok DC/DC pretvornika začne teči iz omrežja v akumulator in se ustali pri približno 3.5 A.

3. Pri omrežni napetosti 239.6 V, ki jo prikazuje prvi graf, pride s časovnim zamikom 10 ms do preklopa akumulatorja. Ob preklopu se napetost na akumulatorju, ki postane enaka izhodni napetosti DC/DC pretvornika, skočno zviša, ker priklopi na kondenzator, ki se je ob zagonu omrežja napolnil na napetost, višjo od omrežne napetosti.



Sl. 5.4: Tokovi in napetosti v DC/DC pretvorniku in regulacijskem vezju za akumulator

4. Tudi tok polnjenja akumulatorja - to je izhodni tok DC/DC pretvornika – se iz razloga, opisanega v točki 3, ob preklopu skočno poveča.

5. Zadnji graf prikazuje zgoščeno žagasto napetost oscilatorja pri frekvenci 25 kHz ter napetost, ki predstavlja razliko med dejansko in želeno napetostjo omrežja. Ker je vhodni tok pretvornika relativno majhen glede na nazivni tok, mora biti čas prevajanja IGBT kratek v primerjavi s časom v zapornem stanju. Zato se razlika med dejansko in želeno napetostjo ustali bolj pri vrhu žagaste napetosti z amplitudo 1V, kar pomeni razliko med dejansko in želeno napetostjo okrog 0.8 V.

6. POVEZAVA VIROV IN PORABE

6.1 ELEMENTI POVEZOVALNIH VODOV

6.1.1 Vodniki

Pri prenosu električne energije je pri vodnikih pomemben predvsem padec napetosti ter s tem povezane izgube. Tokovna omejitev vodov zaradi segrevanja je postavljena precej višje kot je v obravnavanem primeru tokovna omejitev zaradi padca napetosti.

Za zagotovitev obratovalne napetosti znotraj določenega območja napetosti morajo biti preseki vodnikov dovolj veliki. Najmanjše preseke vodnikov, ki še ustrezajo zahtevam, izračunamo po enačbi:

$$S = \frac{\rho \cdot (2 \cdot l) \cdot P}{\frac{x}{100} \cdot U^2} \quad (6.1)$$

kjer je

S najmanjši še ustrezen presek vodnika [mm^2],
 ρ specifična upornost [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$],
 $(2 l)$ dvojna razdalja med virom in porabnikom [m],
 P prenešena moč [W],
 x dovoljen procentualni padec napetosti [%],
 U napetost vira [V].

Specifična upornost ρ za baker (Cu) znaša $0.018 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, za aluminij (Al) pa $0.031 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.

Dvojna razdalja je upoštevana, ker električni tok teče po enem vodniku od vira do bremena in po drugem vodniku nazaj od bremena do vira. Pri tem na obeh vodnikih pride do padca napetosti. Na bremenu je torej napetost znižana za vsoto obeh padcev napetosti.

Bistven vpliv na potrebne preseke vodnikov ima napetost, pri kateri deluje omrežje. Presek vodnika je kvadratno inverzno odvisen od napetosti omrežja. Če hočemo pri nazivni napetosti omrežja $U_n = 230 \text{ V}$ doseči padec napetosti na vodih pod 5 %, za prenos moči 2.3 kW na razdalji 500 m, rabimo dva bakrena vodnika s presekom 16 mm^2 . Za isti primer bi pri nazivni napetosti $U_n = 48 \text{ V}$ rabili vodnika s presekom 370 mm^2 , pri $U_n = 12 \text{ V}$ pa presek 1500 mm^2 . Vpliv napetosti na presek vodnikov je podrobneje predstavljen v poglavju 2.5.1.

Glede na trenutne cene vodnikov so za isti presek kabli z Al vodniki za približno 20% cenejši od kablov s Cu vodniki. Ob upoštevanju, da je za isto prevodnost kabla potreben presek Al vodnika 1.7-krat večji od preseka Cu vodnika, je uporaba bakrenih kablov upravičena [51, 52].

Pri nadzemnih vodih je potrebno poleg električnih parametrov upoštevati tudi mehanske parametre vodnikov. Natezna trdnost Al/Je vodnikov je večja od Cu vodnikov in prenesejo večje mehanske obremenitve, zato so s stališča stroškov za nadzemne vode Al/Je vodniki bolj primerni.

6.1.2 Odklopniki, varovalke

Na tržišču je na voljo precej odklopnikov in varovalk za enosmerne tokove in za napetosti do 500 V. Odklopnike se lahko uporabi tudi kot stikala. Z njimi ščitimo vodnike povezovalnih vodov, inštalacijske vodnike, porabnike in akumulator.

Za proizvodne enote, ki so na omrežje priključeni preko DC/DC pretvornikov, zaščito vgradimo v posamezen DC/DC pretvornik.

6.2 HIŠNA INŠTALACIJA

Pri vodnikih za hišno inštalacijo izbiramo prevodnost vodnikov glede na tokovno omejitev zaradi termičnega segrevanja. Zahtevani presek vodnikov je linearno odvisen od toka, ta pa je za določeno moč obratno sorazmeren obratovni napetosti. Torej za dvakrat manjšo napetost rabimo dvakrat večje prereze vodnikov. Za obravnavani primer rabimo pri napetosti 230 V bakrene vodnike s presekom minimalno 1.5 mm², pri napetosti 48 V pa vodnike s presekom minimalno 6 mm². [53].

Obstajajo tudi diferenčna zaščitna stikala, ki poleg razlike v izmeničnih tokovih zaznavajo in izklapljujejo tudi razlike v enosmernih tokovih. To so diferenčna zaščitna stikala tipa B po standardu EN 61008 / DIN VDE 0664 [54, 55].

7. POENOSTAVLJENI MODEL OMREŽJA

Za digitalno simulacijo enosmernega izoliranega omrežja smo poleg detajlnega modela, kjer so viri in akumulator modelirani tako, kot je opisano v poglavju 4 oz. 5, izdelali tudi poenostavljeni model omrežja, kjer je posamezen vir skupaj s pretvornikom predstavljen kot regulabilni tokovni vir, katerega tok je reguliran tako, da v omrežje oddaja predvideno energijo. Ta model je zaradi enostavnosti in posledično zaradi hitrosti digitalne simulacije primeren za proučevanje daljših časovnih obdobj, kot na primer za prikaz 24-urnega obratovanja omrežja.

Razlog, zakaj smo za celodnevno opazovanje omrežja izdelali poenostavljen model je v trajanju digitalne simulacije. Digitalna simulacija pri detajlnem modelu za čas simulacije 1 s traja v našem primeru okrog 30 minut. To je predvsem posledica kratkega časovnega koraka integracije, ki lahko znaša največ 5 μ s, glede na to, da je frekvenca delovanja DC/DC pretvornikov 25 kHz. S poenostavitvijo modela smo opustili detajlni prikaz DC/DC pretvornikov in s tem zvišali korak integracije na 500 μ s, poleg tega pa je trajanje digitalne simulacije hitrejše tudi zaradi manjšega števila vej in vozlišč v poenostavljenem modelu. Poenostavljeni modeli virov so v stacionarnem stanju enakovredni detajlnim modelom, hitri prehodni pojavi pa so zanemarjeni.

7.1 MODEL POENOSTAVLJENEGA OMREŽJA

Posamezen vir skupaj s DC/DC pretvornikom je v poenostavljenem modelu omrežja predstavljen kot regulabilni tokovni vir, katerega tok je reguliran tako, da v omrežje oddaja predvideno moč. Regulabilni tokovni vir smo v programu PS CAD / EMTDC modulirali kot tokovni vir z zunanjo kontrolo toka. Vrednost tega toka smo določili s pomočjo integratorja, ki integrira razliko med predpostavljeno močjo in izmerjeno močjo, ki je produkt toka in napetosti vira. Integrator se tako ustali pri taki vrednosti za tok, da je prej omenjena razlika moči enaka nič.

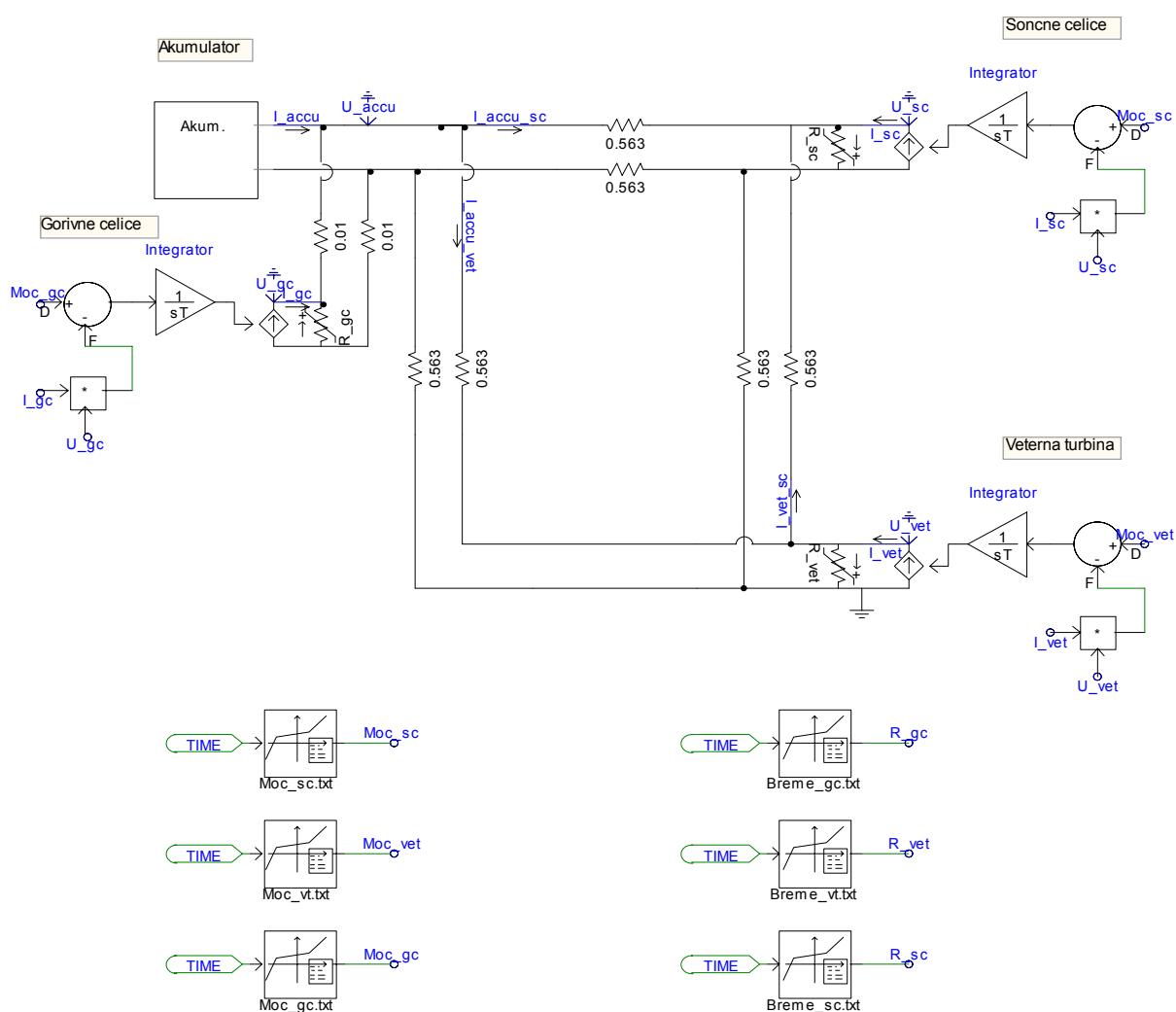
Akumulator je predstavljen kot napetostni vir, ki ima pri polnjenju konstantno napetost, pri napajanju omrežja pa je napetost odvisna od stopnje napolnjenosti in od velikosti toka tako, kot v detajlnem modelu, ki je opisan v poglavju 5.

Bremena so predstavljena kot spremenljivi ohmski upori. Velikost teh uporov je nastavljena tako, da pri 230 V porabljajo predpostavljeno moč. Predvidena časovna porazdelitev porabe je definirana tabelarično v tekstovnih datotekah; za porabo pri sončnih celicah v datoteki Breme_sc.txt, za porabo pri vetrni turbini v datoteki Breme_vt.txt in za porabo pri gorivnih celicah v datoteki Breme_gc.txt.

Predvidena časovna porazdelitev proizvodnje virov je prav tako kot poraba definirana tabelarično v tekstovnih datotekah; za moč sončnih celic v datoteki Moc_sc.txt, za moč veterne turbine v datoteki Moc_vt.txt, in za moč gorivnih celic v datoteki Moc_gc.txt.

Vodi so predstavljeni kot ohmske upornosti z upornostjo 0.563 ohma, ki predstavljajo bakren vodnik preseka 16 mm².

Zgradba poenostavljenega modela je prikazana na sl. 7.1.

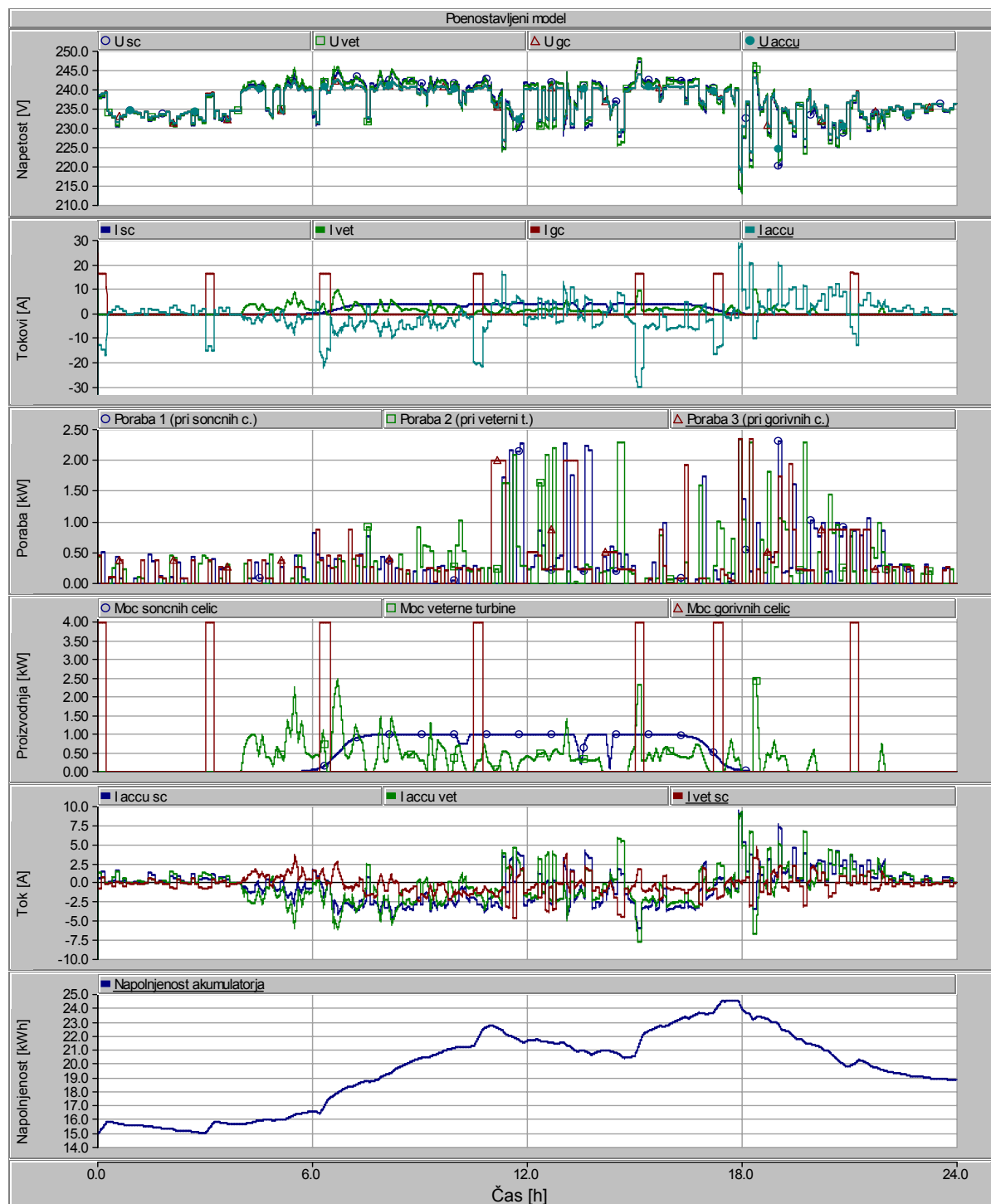


Sl. 7.1: Zgradba poenostavljenega modela omrežja

7.2 REZULTATI DIGITALNE SIMULACIJE POENOSTAVLJENEGA MODELA

Na sl. 7.2 je prikazan rezultat digitalne simulacije poenostavljenega modela, ki prikazuje razmere v omrežju ob predpostavljenih potekih proizvodnje in porabe. Časovni potek proizvodnje in porabe predvideva tudi najbolj neugodne razmere

obratovanja, to je najnižjo porabo ob hkratni najvišji proizvodnji ob 15. uri ter najvišjo porabo ob hkratni najnižji proizvodnji, ki nastopi ob 18. uri. Posamezne oznake veličin v grafih se nanašajo na sl. 7.1.



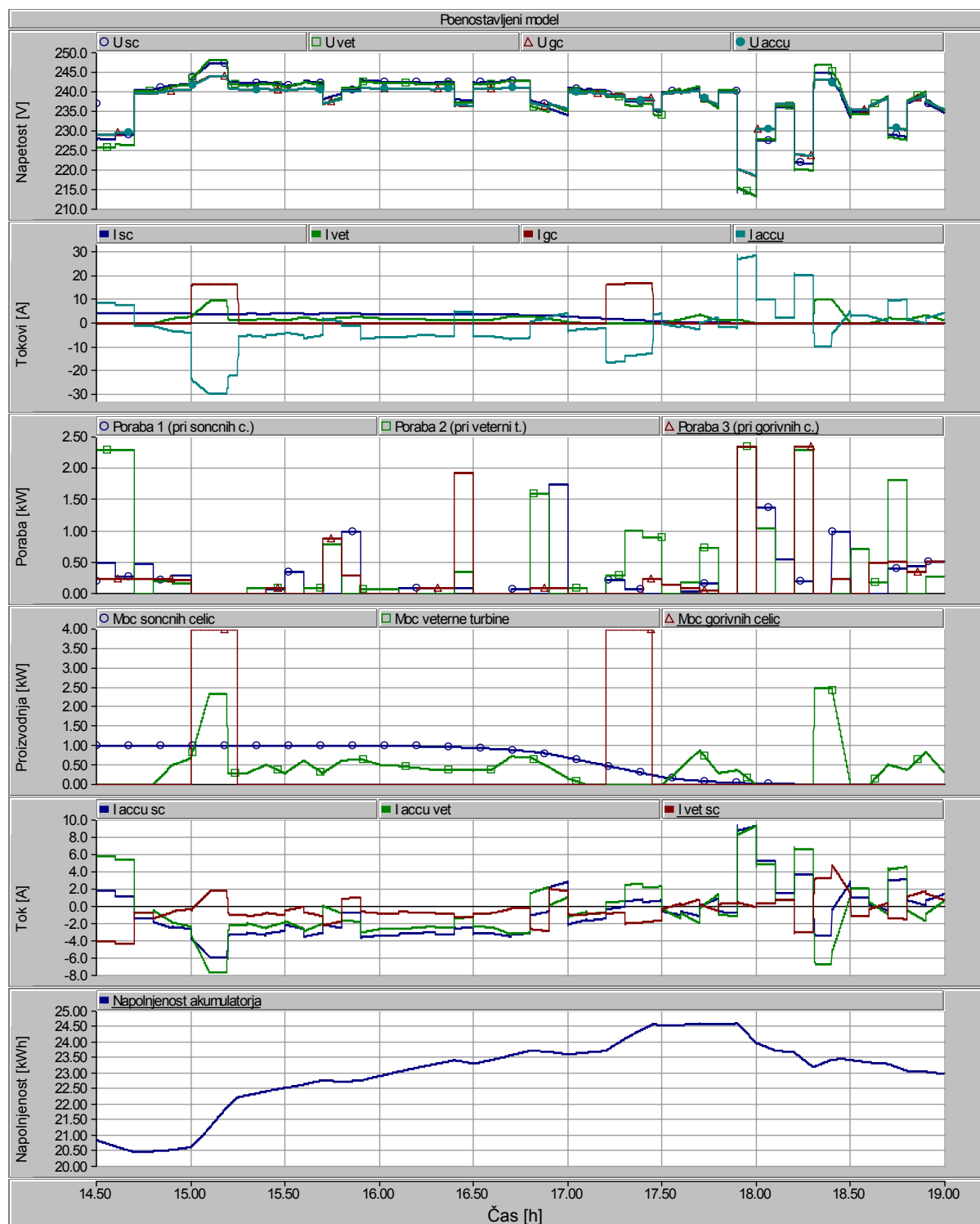
Sl. 7.2: Rezultat digitalne simulacije poenostavljenega modela za celodnevno obratovanje

Po vrsti je iz posameznih grafov je razvidno sledeče:

1. Napetost v vseh točkah omrežja ves čas v območju $\pm 10\%$ nazivne napetosti.
2. Tok akumulatorja ne preseže vrednosti 30 A ne pri polnjenju in ne pri praznjenju.
3. Poraba se skočno spreminja. Največja poraba je predvidena v zgodnjih popoldanskih in v večernih urah, ko znaša do 2,3 kW na stanovniško enoto.
4. Gorivne celice obratujejo s polno močjo glede na potrebe po toploti – predvidoma sedemkrat na dan po 15 minut. Predvidena moč vetra se spreminja naključno čez cel dan. Predvidena moč sončnih celic je konstantna od 7. do 17. ure, z nekajkratnimi vmesnimi prekinitvami, ki bi lahko predstavljale kratkotrajne oblačnosti.
5. Tokovi posameznih vodov se spreminjajo glede na proizvodnjo in porabo električne energije. Tokovi, ki nastopajo v omrežju so manjši od 10 A
6. Akumulator se tekom dneva naplani za 4 kWh. Pred večerno konico znaša največja napolnjenost okrog 24,5 kWh.

Ker grafi na sl. 7.2 prikazujejo celodnevno dogajanje v omrežju, so precej zgoščeni. Zato so tokovi in napetosti v omrežju še enkrat predstavljeni na sl. 7.3, ki prikazuje krajše časovno obdobje med 14. in 19. uro, v katerem nastopajo najvišje in najnižje vrednosti tokov in napetosti.

Največja poraba, ki nastopi ob 18. uri in jo prikazuje tretji graf, je pri vseh treh porabnikih enaka, to je 2.3 kW, zato se pri prikazu v grafu krivulje prekrivajo. Vidna je le poraba pri gorivnih celicah, ostali dve sta izrisani pod njo.

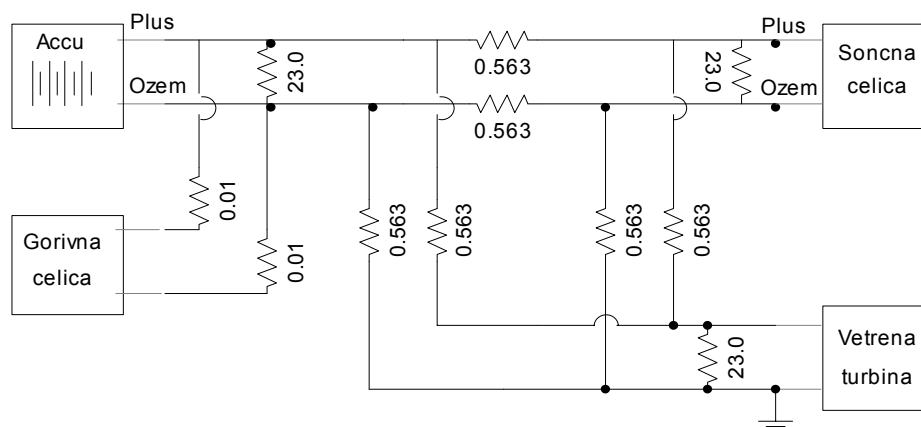


Sl. 7.3: Rezultat digitalne simulacije poenostavljenega modela za obdobje od 14. do 19. ure

8. SIMULACIJA OBRATOVANJA DETAJLNEGA MODELA OMREŽJA

V detajlnem modelu omrežja so viri in akumulator skupaj z DC/DC pretvorniki predstavljeni tako, kot je opisano v poglavju 4. Model prikazuje dejansko dogajanje – to je napetosti, tokove in regulacijske veličine znotraj posameznih virov in DC/DC pretvornikov. Frekvenca preklpov IGBT-jev DC/DC pretvornikov je 25 kHz. Model je primeren za proučevanje krajših časovnih obdobji, to je predvsem za prikaz različnih prehodnih pojavov.

Na sl. 8.1 je predstavljeno simulirano omrežje s posameznimi viri, ki so predstavljeni kot dvopolne komponente, znotraj teh komponent pa je izvedeno vezje za posamezen vir in za akumulator kot je opisano v poglavju 4 oz. 5. Bremena so predstavljena kot ohmski upori. Velikost teh uporov na sl. 8.1 je $23\ \Omega$, kar pri napetosti 230 V predstavlja moč 2.3 kW, to je toliko, kolikor znaša predvidena največja moč porabe posameznega odjemnega mesta. Vodi so predstavljeni kot ohmske upornosti $0.563\ \Omega$, kar predstavlja bakren vodnik preseka $16\ \text{mm}^2$.



Sl. 8.1: Detajlni model omrežja

Oznake napetosti in tokov v grafih, ki sledijo v nadaljevanju, predstavljajo naslednje veličine:

- $U_{accu\ omr} \dots$ napetost omrežja v točki priklopa akumulatorja,
- $U_{sc\ omr} \dots$ napetost omrežja v točki priklopa sončnih celic,
- $U_{gc\ omr} \dots$ napetost omrežja v točki priklopa gorivnih celic,
- $U_{vet\ omr} \dots$ napetost omrežja v točki priklopa veterne turbine,

- $U_{accu} \dots$ napetost na sponkah akumulatorja,
- $U_{sc} \dots$ napetost na sponkah sončnih celic,

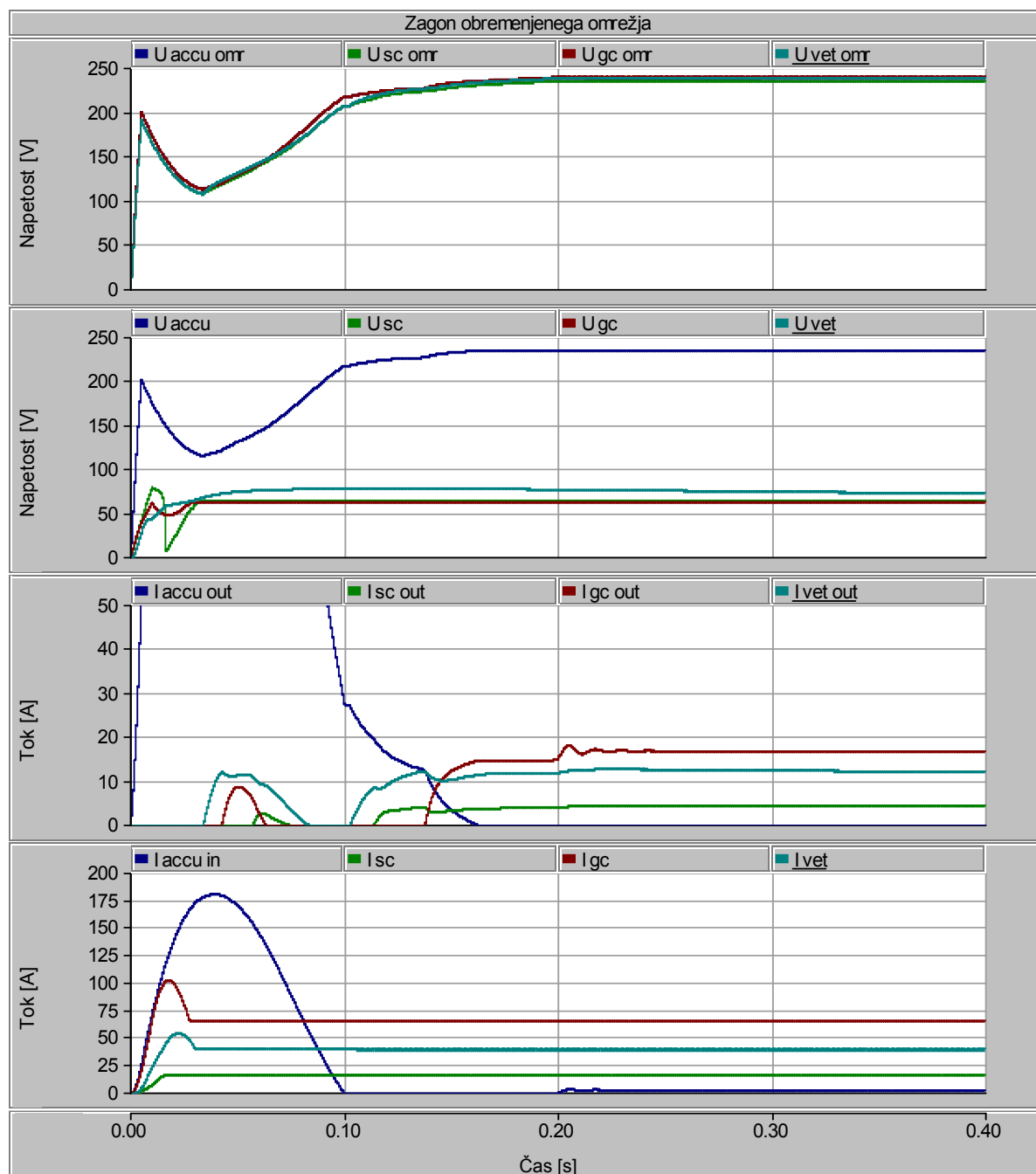
- U_{gc} napetost na sponkah gorivnih celic,
 U_{vet} izhodna napetost usmernika veterne turbine,
- $I_{accu out}$ izhodni tok akumulatorja,
 $I_{sc out}$ izhodni tok DC/DC pretvornika sončnih celic,
 $I_{gc out}$ izhodni tok DC/DC pretvornika gorivnih celic,
 $I_{vet out}$ izhodni tok DC/DC pretvornika veterne turbine,
- $I_{accu in}$ vhodni tok DC/DC pretvornika pri polnjenju akumulatorja,
 I_{sc} tok sončnih celic – vhodni tok DC/DC pretvornika,
 I_{gc} tok gorivnih celic – vhodni tok DC/DC pretvornika,
 I_{vet} izhodni tok usmernika veterne,
- $I_{accu sc}$ tok voda med akumulatorjem in sončnimi celicami s strani akumulatorja,
 $I_{sc accu}$ tok voda med akumulatorjem in sončnimi celicami s strani sončnih celic
 $I_{accu vet}$ tok voda med akumulatorjem in veterno turbino s strani akumulatorja,
 $I_{vet accu}$ tok voda med akumulatorjem veterno turbino s strani veterne turbine,
 $I_{sc vet}$ tok voda med sončnimi celicami in veterno turbino s strani sončnih celic,
 $I_{sc vet}$ tok voda med sončnimi celicami in veterno turbino s strani veterne turbine.

Napetosti in tokovi so podani v voltih in amperih.

8.1 ZAGON OBREMENJENEGA OMREŽJA

Za opazovanje razmer v omrežju ob zagonu je predpostavljeno, da je poraba na vseh treh točkah omrežja največja možna – to je 2.3 kW. Porabo predstavljajo upornosti velikosti 23Ω . Omrežje je tako kot na sl. 8.1. V trenutku zagona so gorivne celilce že pripravljene na obratovanje s polno močjo, veterna turbina se v tem trenutku že vrti z nazivno hitrostjo in sončne celice so že obsijane s soncem.

Ob zagonu v omrežju ni napetosti in tokov, prav tako ni napetosti v DC/DC pretvornikih, katerih kondenzatorji so prazni. Rezultat digitalne simulacije je prikazan na sl. 8.2. Čas simulacije je 0.4 sekunde. Iz posameznih grafov v vrstnem redu od zgorja navzdol je razvidno sledeče:



Sl. 8.2: Rezultat digitalne simulacije zagona obremenjenega omrežja

1. Napetosti v omrežju v času 0.2 s dvignejo do napetosti okrog 240 V. Počasen dvig napetosti je posledica polnjenja kondenzatorjev na izhodu DC/DC pretvornikov. Po času $t = 0.2$ s ostane napetost konstantna. Napetost v točki priklopa akumulatorja po prehodnem pojavu je 240.5 V. To napetost vzdržuje DC/DC pretvornik, ki polni akumulator. Napetost omrežja v točki priklopa veterne turbine po končanem prehodnem pojavu je zelo blizu napetosti v točki priklopa akumulatorja, saj se moč, ki jo veterna turbina proizvaja, porablja na mestu proizvodnje in ne teče k akumulatorju. Zaradi tega na vodu med veterno turbino in akumulatorjem ni padca napetosti. Napetost omrežja v točki priklopa sončnih celic je

nižja od napetosti pri akumulatorju, ker je proizvodnja, ki znaša 1 kW, manjša od porabe 2.3 kW in padec napetosti nastane zaradi toka, ki teče od akumulatorja proti porabniku pri sončnih celicah. Napetost v točki priklopa gorivnih celic se skoraj ne spremeni, saj so le-te priključene zelo blizu akumulatorja in je upornost vodov med njima le 0.01Ω .

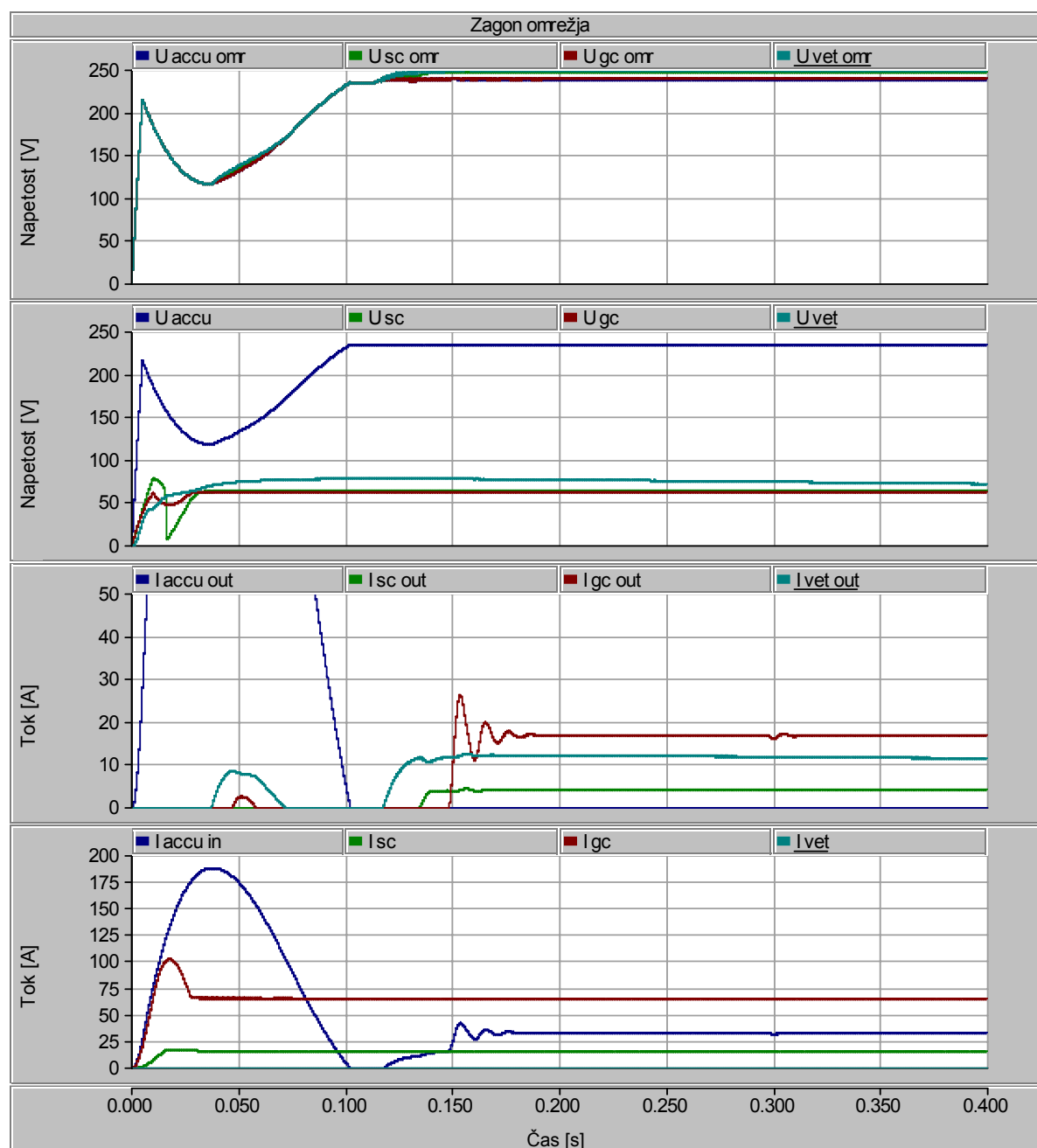
2. Napetosti na sponkah akumulatorja po hitrem dvigu upade kot posledica velikega toka. Napetosti ostalih virov se hitro dvignejo in ostanejo konstantne ves čas trajanja simulacije. Usmerjena napetost generatorja veterne turbine rahlo pada, kar je posledica nihanja te napetosti, ki se izniha v času reda nekaj sekund.

3. Tok akumulatorja ob zagonu naraste na veliko vrednost – okrog 190 A. Ta tok je predvsem posledica polnjenja kondenzatorja lastnega DC/DC pretvornika za polnjenje, deloma pa posledica tega, da do časa $t = 0.15$ s vsa bremena napaja akumulator. Ostali viri s konstantno močjo polnijo kondenzatorje svojih DC/DC pretvornikov in v omrežje tokovi virov ne tečejo, dokler napetost na kondenzatorjih ni višja od napetosti omrežja. Okrog časa $t = 0.15$ s začnejo viri napajati omrežje, zato se tok akumulatorja zmanjšuje in v času $t = 0.16$ s akumulator omrežja ne napaja več. Od tega časa pa do časa $t = 0.2$ s napetost v točki priklopa akumulatorja narašča od napetosti, ki jo ima akumulator pri določeni stopnji napolnjenosti v neobremenjenem stanju, do napetosti, ko se začne polnjenje akumulatorja. Ta napetost, ki pomeni signal za začetek polnjenja akumulatorja, je za približno 1 V višja od napetosti sponk neobremenjenega akumulatorja pri največji napolnjenosti. V obravnavanem primeru je stopnja napolnjenosti akumulatorja določena na konstantno vrednost 0.6, kar pomeni, da je napetost neobremenjenega akumulatorja $U = 235.9$ V. Ker bi bila napetost polnjega neobremenjenega akumulatorja $U = 239.4$ V, se polnjenje akumulatorja prične pri $U = 240.5$ V, ki jo omrežje doseže v $t = 0.2$ s.

4. Vhodni tok DC/DC pretvornika za polnjenje akumulatorja je v začetku velik, ker se polni njegov kondenzator. Tok za polnjenje kondenzatorja zagotavlja akumulator. Tokovi ostalih virov imajo v samem začetku konico, ki predstavlja tok, ki teče v izhodne kondenzatorje DC/DC pretvornikov v času, ko je napetost virov višja od napetosti kondenzatorjev, ki so na omrežni strani pretvornikov. Teh tokov z našim principom regulacije ne moremo zmanjšati, ker tečejo neposredno, pri čemer IGBT ne prevaja. Ko se napetost na kondenzatorjih dvigne nad napetost virov, se prične regulacija toka iz nižje na višjo napetost, ki deluje na principu vklapljanja in izklapljanja IGBT in posledično inducirane napetosti v tuljavi. Princip regulacije je podrobneje opisan v poglavju 4.3.4. Tokovi virov imajo konstantno vrednost, pri tem do časa $t = 0.15$ s DC/DC pretvorniki napajajo lastne kondenzatorje, po tem času pa začnejo z napajanjem omrežja. V času $t = 0.2$ s se začne polnjenje akumulatorja.

8.2 ZAGON NEOBREMENJENEGA OMREŽJA

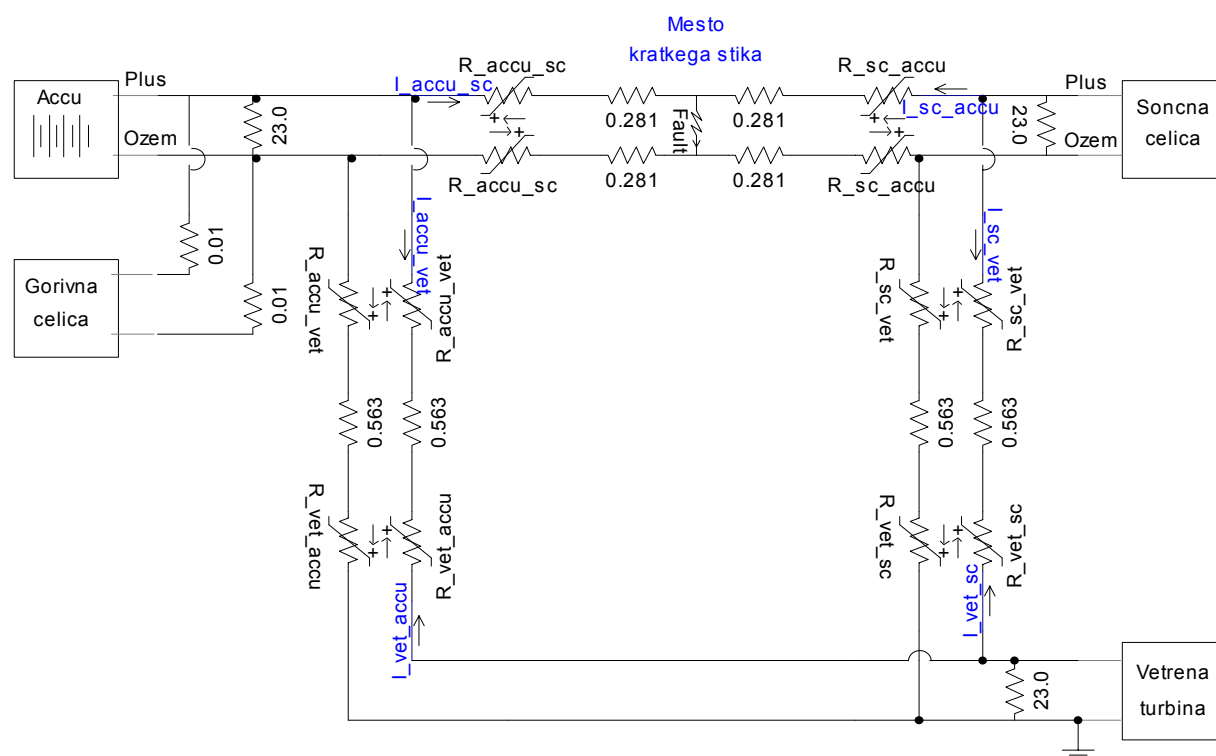
Zagon neobremenjenega omrežja se od zagona obremenjenega omrežja razlikuje le v posameznih detajlih. Razlika je v krajšem trajanju prehodnega pojava in v večjem toku polnjenja akumulatorja, saj se vsa proizvedena moč virov pretaka v akumulator. Zaradi povečanega toka od virov k akumulatorju se napetosti omrežja v točki priklopa sončnih celic in veterne turbine zvišata, kar je posledica padcev napetosti na vodih. Napetost v točki priklopa gorivnih celic se skoraj ne spremeni, saj so le-te priključene zelo blizu akumulatorja. Rezultat digitalne simulacije zagona neobremenjenega omrežja je predstavljen na sl. 8.3.



Sl. 8.3: Rezultat digitalne simulacije zagona neobremenjenega omrežja

8.3 KRATEK STIK NA VODU Z VKLJUČENO NADTOKOVNO ZAŠČITO

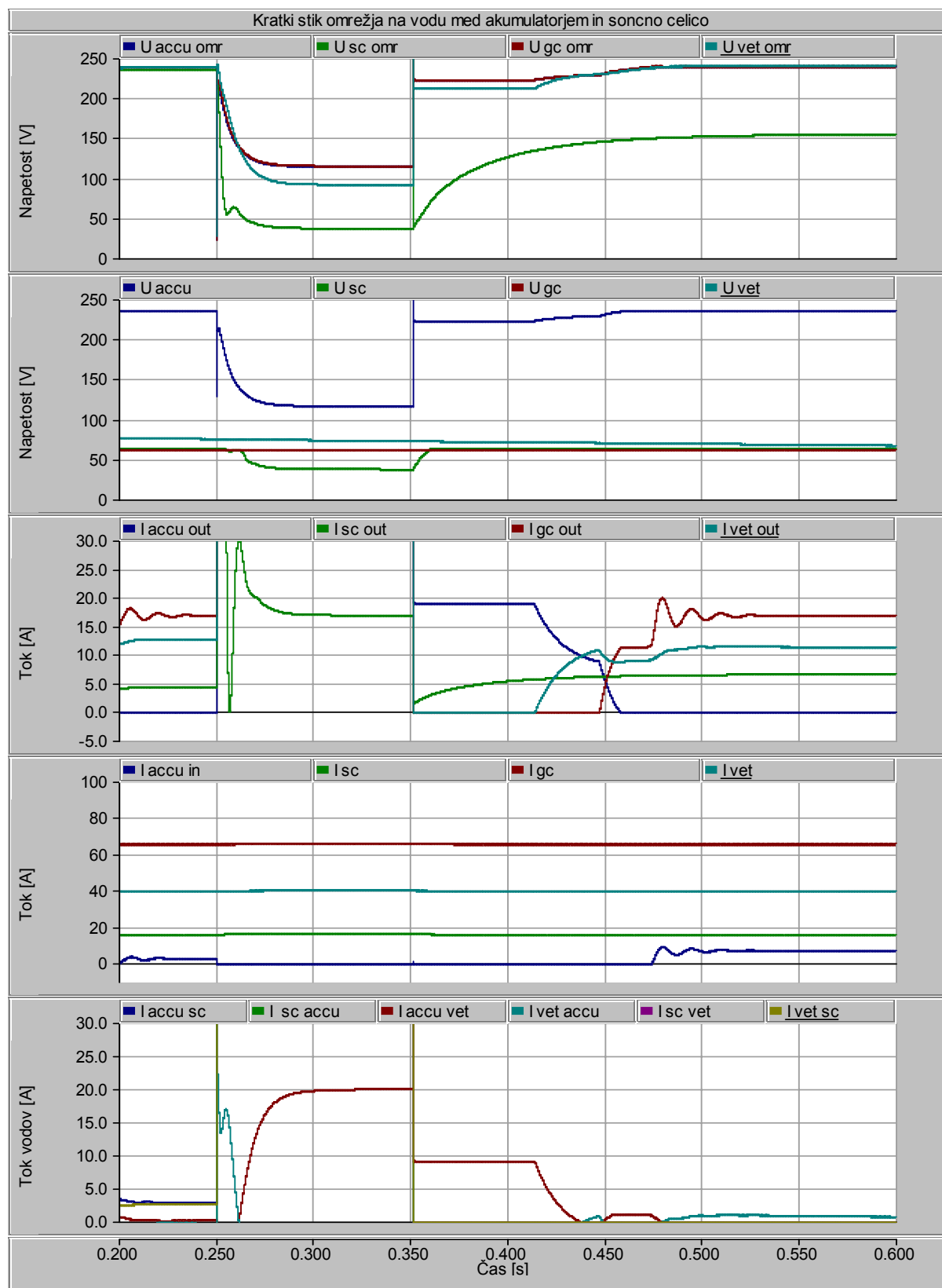
Za digitalno simulacijo kratkega stika na vodu je bil model, ki je prikazan na sl. 8.1, razširjen tako, da smo vsak vodnik posameznih vodov na vsaki strani zaščitili z nadtokovno zaščito – to je z odklopniki, ki pri toku nad 50 A po času 100 ms tok izklopijo. Odklopniki so modelirani kot ohmske upornosti, ki imajo v stanju prevajanja upornost 0.0001Ω , v stanju izklopa pa upornost 1000000Ω . Model omrežja za simulacijo kratkega stika na vodu je prikazan na sl. 8.4.



Sl. 8.4: Model omrežja za simulacijo kratkega stika na vodu

Rezultat digitalne simulacije kratkega stika na vodu med akumulatorjem in sončnimi celicami je prikazan na sl. 8.5. Kratek stik se zgodi ob času $t = 0.25$ s. Čas digitalne simulacije je 0.6 s. Prvi del do časa $t = 0.25$ s je identičen zagonu obremenjenega omrežja, zato so na grafih prikazani poteki veličin od časa $t = 0.20$ s dalje.

Na sl. 8.5 so v zadnjem grafu prikazani tudi tokovi posameznih vodov. Kot je razvidno iz tega grafa, se tok voda med akumulatorjem in sončno celico skočno poveča ter se ustali pri 200 A. Prav tako tok med vetrno turbino in sončno celico preseže vrednost 50 A, kar povzroči odklop voda. Tok med akumulatorjem in vetrno turbino vrednosti 50 A ne preseže, zato se ne odklopi. Iz ostalih grafov vidimo naslednje:



Sl. 8.5: Rezultati digitalne simulacije kratkega stika na vodu

1. Napetosti v omrežju se močno znižajo, ker se zaradi velikega toka zniža napetost akumulatorja. Napetost omrežja v točki priključitve sončnih celic se še dodatno zniža zaradi padca na vodu med vetrno turbino in sončnimi celicami. Po

koncu kratkega stika je omrežje v točki priklopa sončnih celic izolirano in napetost tako nizka, da se na bremenu 23Ω porablja moč 1 kW, ki jo sončna celica proizvaja. Ostale točke omrežja vzpostavijo napetost podobno kot pri zagonu obremenjenega omrežja.

2. Akumulator je pri kratkem stiku vezan na omrežje neposredno, zato se njegova napetost zaradi velikega toka zniža. Usmerjena napetost veterne turbine ostane nespremenjena, ker do padca napetosti pride na omrežni strani DC/DC pretvornika. Enako velja za napetost gorivnih celic. Napetost sončnih celic pa se med kratkim stikom zniža. Vzrok za to znižanje je v tem, da je med kratkim stikom napetost omrežja nižje od regulirane obratovalne napetosti sončnih celic in posledično se obratovalna napetost sončnih celic zniža skupaj z omrežno napetostjo.

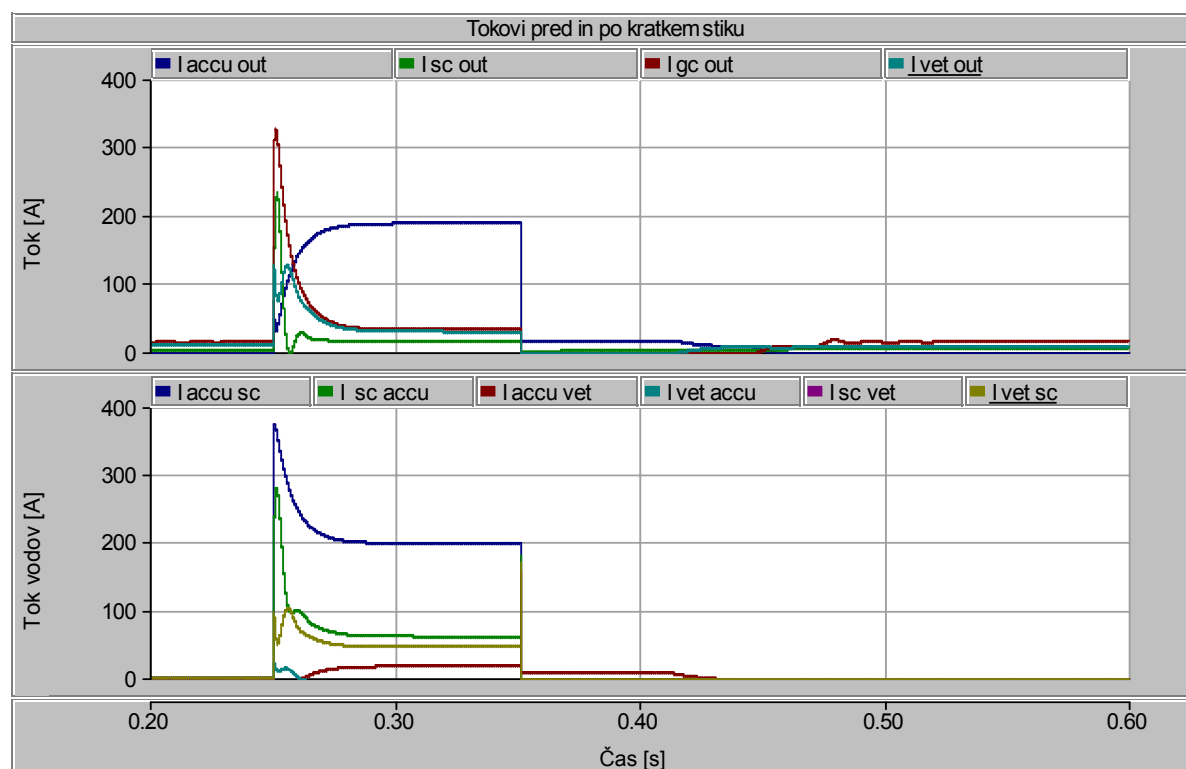
3. Izhodni tokovi DC/DC pretvornikov se v trenutku kratkega stika skočno povečajo. Tokove zagotavljajo kondenzatorji na izhodih teh pretvornikov. Po času $t = 0.1$ s se tokovi ustalijo pri taki vrednosti, da glede na znižano napetost v omrežje teče proizvedena moč. Dogajanje v omrežju po izklopu kratkega stika je podobno kot pri zagonu omrežja, z izjemo sončne celice, ki je izolirana od sistema. Velikost in oblika tokov med trajanjem kratkega stika je prikazana na sl. 8.6.

4. Tokovi posameznih virov se ne spremenijo, kar je posledica tega, da so na omrežje priključeni preko DC/DC pretvornikov, ki zagotavljajo pravilne tokove in napetosti virov.

5. Na zadnjem grafu so prikazani tokovi v posameznih vodih. Iz tega grafa je razvidno, da po koncu kratkega stika obratuje le še vod med akumulatorjem in veterno turbino, katerega tok kratkega stika ni presegel vrednosti 50 A.

Ker so kratkostični tokovi precej večji od tokov v normalnem obratovanju, ki so prikazani na tretjem in petem grafu na sl. 8.5, so ti kratkostični tokovi v celoti prikazani na grafih na sl. 8.6.

Glede na to, da je prišlo do izklopa voda med sončnimi celicami in veterno turbino, na katerem ni bilo kratkega stika, nadtokovna zaščita za optimalno delovanje omrežja ni zadostna. Težava je v tem, da imamo zazankano omrežje, ki ga je težje ščititi. Za pravino zaščito bi potrebovali distančno zaščito ali pa vzdolžno diferenčno zaščito, ki izklopi le tisti vod, katerega tok na eni strani je različen od toka na drugi strani voda. V naslednjem podpoglavju je prikazana digitalna simulacija omrežja z vzdolžno diferenčno zaščito, ki izklopi le vod, na katerem nastane kratek stik. Pojavlja pa se vprašanje smiselnosti take zaščite za nizkonapetostno omrežje zaradi visoke cene zaščitnih naprav.



Sl. 8.6: Tokovi kratkega stika na vodu

Poleg tega se izkaže, da obratovanje omrežja po kratkem stiku ni pravilno, saj omrežje pri sončni celici, ki je izolirano od akumulatorja, obratuje pri prenizki napetosti. Zato smo v model dodali še prenapetostno in podnapetostno zaščito. Rezultati digitalne simulacije takega modela so predstavljeni v naslednjem podpoglavju.

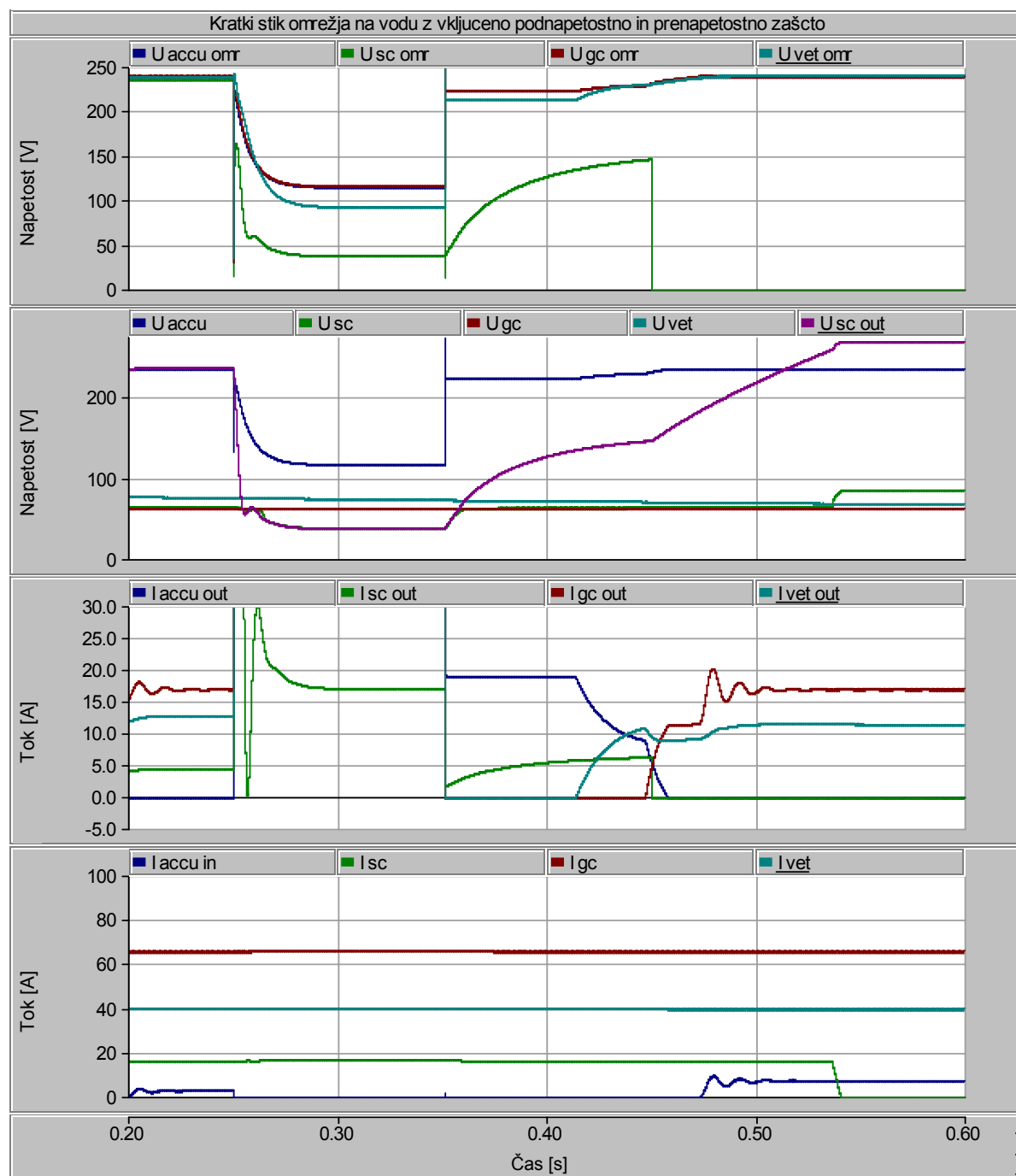
8.4 KRATEK STIK NA VODU Z VKLJUČENO PODNAPETOSTNO IN PRENAPETOSTNO ZAŠČITO

Zaradi možnega obratovanja virov brez povezave z akumulatorjem smo dodali prenapetostno in podnapetostno zaščito. Če točka omrežja, ki jo napaja določen vir preko DC/DC pretvornika ni povezana z akumulatorjem, napetost te točke določa razmerje med proizvodnjo in porabo. Napetost se torej zviša ali zniža do take stopnje, da se poraba izenači s proizvodnjo. Da se prepreči previsoke ali prenizke napetosti, smo v DC/DC prevornike virov vgradili prenapetostno in podnapetostno zaščito. Prenapetostna zaščita je izvedena kot del regulacije, ki blokira vklop IGBT, če je napetost na izhodu pretvornika višja od največje dovoljene napetosti. Tako ostane napetost izhoda konstantno na tej napetosti. Nasprotno pa pri prenizki napetosti na izhodu DC/DC pretvornika vir ne proizvaja dovolj moči za pokrivanje porabe, zato je potrebno vir odklopiti od omrežja. Čas vklopa podnapetostne zaščite je daljši od časa delovanja nadtokovne zaščite vodov in znaša 200 ms. Stikalo za izklop smo v programu PS CAD modelirali kot spremenljivo upornost, ki po času 0.2 s od znižanja napetosti pod 200 V spremeni upornost iz $0.1 \text{ m}\Omega$ na $1 \text{ M}\Omega$. Obratovanja samih sončnih celic in DC/DC pretvornika nismo ustavili, zato napetost na izhodnem kondenzatorju, ki je po delovanju podnapetostne zaščite ločen od omrežja, narašča do najvišje dovoljene napetosti in na tej napetosti zaradi prenapetostne zaščite ostane.

Digitalna simulacija delovanja prenapetostne in podnapetostne zaščite je prikazana na primeru kratkega stika iz prejšnjega podpoglavja. Rezultati so predstavljeni na sl.8.7.

Kot je razvidno iz rezultatov digitalne simulacije, je prvi del do časa $t = 0.45 \text{ s}$ enak kot brez podnapetostne zaščite. V času $t = 0.45 \text{ s}$ se vkjuči podnapetostna zaščita DC/DC pretvornika pri sončnih celicah, ker je napetost na izhodu pretvornika že 0.2 s manjša od najnižje dovoljene. V tem trenutku se DC/DC prevornik odklopi od omrežja. Iz posameznih grafov je razvidno sledeče:

1. Napetost omrežja v točki priklopa sončnih celic po delovanju podnapetostne zaščite pade na vrednost nič.
2. V drugi graf smo dodali napetost na izhodnem kondenzatorju DC/DC pretvornika, ki kaže, da se ta napetost po delovanju podnapetostne zaščite zviša do največje dovoljene napetosti in pri tej napetosti ostane. Ker v takem stanju sončne celice ne dajejo nobenega toka, se njihova napetost zviša na napetost odprtih sponk, ki po U/I karakteristiki na sl. 4.6 za dva zaporedno vezana modula znaša 87 V.



Sl. 8.7: Kratek stik na vodu z vključeno prenapetostno in podnapetostno zaščito

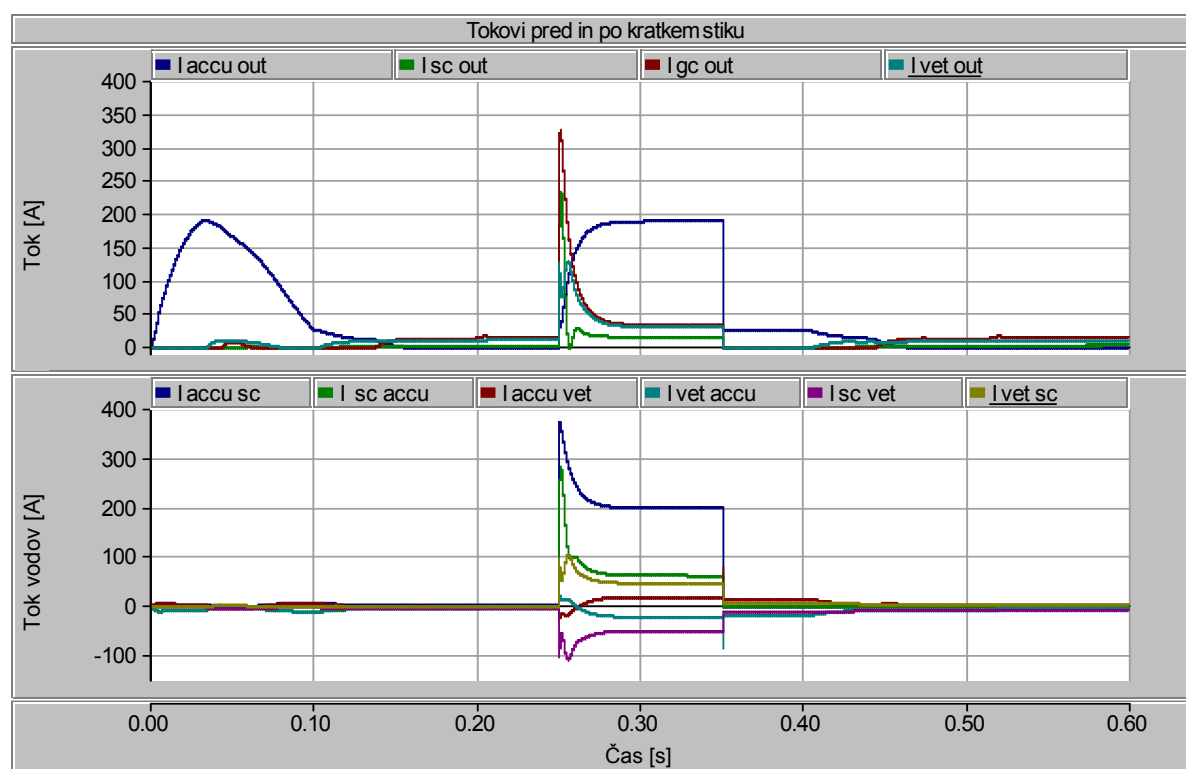
3. Izhodni tok DC/DC pretvornika sončnih celic po delovanju podnapetostne zaščite se prekine.

4. Tok sončnih celic po delovanju podnapetostne zaščite še teče do časa $t = 0.54\text{ s}$, ko nastopi prenapetostna zaščita, ki ta tok sončnih celic prekine.

8.5 KRATEK STIK NA VODU Z VKLJUČENO VZDOLŽNO DIFERENČNO ZAŠČITO

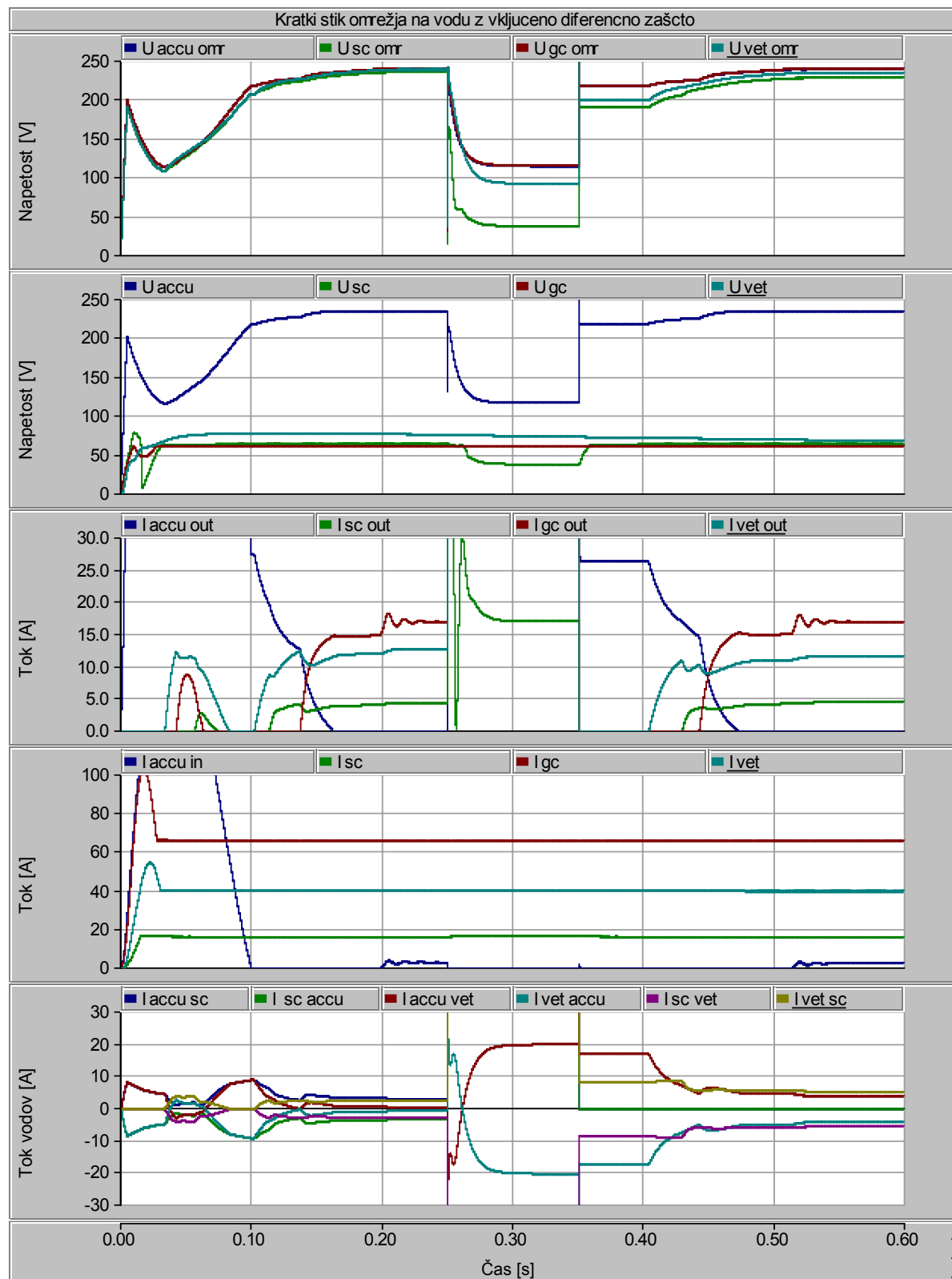
Za digitalno simulacijo omrežja pri kratkem stiku smo v tem primeru nadtokovno zaščito zamenjali z vzdolžno diferenčno zaščito, ki v primeru, da je tok na eni strani voda drugačen od toka na drugi strani, vod izklopi v času 0.1 s. Rezultati digitalne simulacije kažejo, da je prišlo do izklopa voda, na katerem je nastal kratek stik, ostali vodi pa ostanejo v obratovanju. Do delovanja podnapetostne zaščite ni prišlo, ker se je napetost omrežja dvignila nad 200 V prej kot v 0.2 s, kolikor znašata nastavitvi podnapetostne zaščite.

Ker so kratkostični tokovi precej večji od tokov v normalnem obratovanju, so ti kratkostični tokovi v celoti prikazani v grafih na sl. 8.8. Iz drugega grafa je lepo vidna nesimetrija tokov voda, na katerem pride do kratkega stika.



Sl. 8.8: Tokovi kratkega stika na vodu pri vzdolžni diferenčni zaščiti

Iz grafov na sl. 8.9 je razvidno, da se razlike v napetosti v različnih točkah omrežja po kratkem stiku povečajo, kar je posledica tega, da se zaradi izpada enega voda tok po drugih dveh vodih poveča.



Sl. 8.9: Kratek stik na vodu z vključeno vzdolžno diferencialno zaščito

8.6 OBRATOVANJE OMREŽJA OB IZPADU AKUMULATORJA

Ob izpadu akumulatorja, ki regulira napetost omrežja, napetost omrežja postane odvisna od razmerja med porabo in proizvodnjo. Posamezni DC/DC pretvorniki, ki skrbijo za pretok proizvedene moči virov v omrežje, vzpostavijo na svojem izhodu, ki je priključen na omrežje, tako napetost, da proizvedena moč teče v omrežje. Če je proizvodnja manjša od porabe, napetost pada, če je večja, napetost narašča. Ker mora biti napetost omrežja znotraj določenih meja, smo DC/DC pretvornikom dodali prenapetostno in podnapetostno zaščito. Prenapetostna zaščita deluje tako, da v primeru previsoke napetosti zmanjšamo moč virov in obratujemo pri najvišji dovoljeni napetosti. Podnapetostna zaščita pa v primeru prenizke napetosti na omrežni strani DC/DC pretvornikov vire izključi iz omrežja.

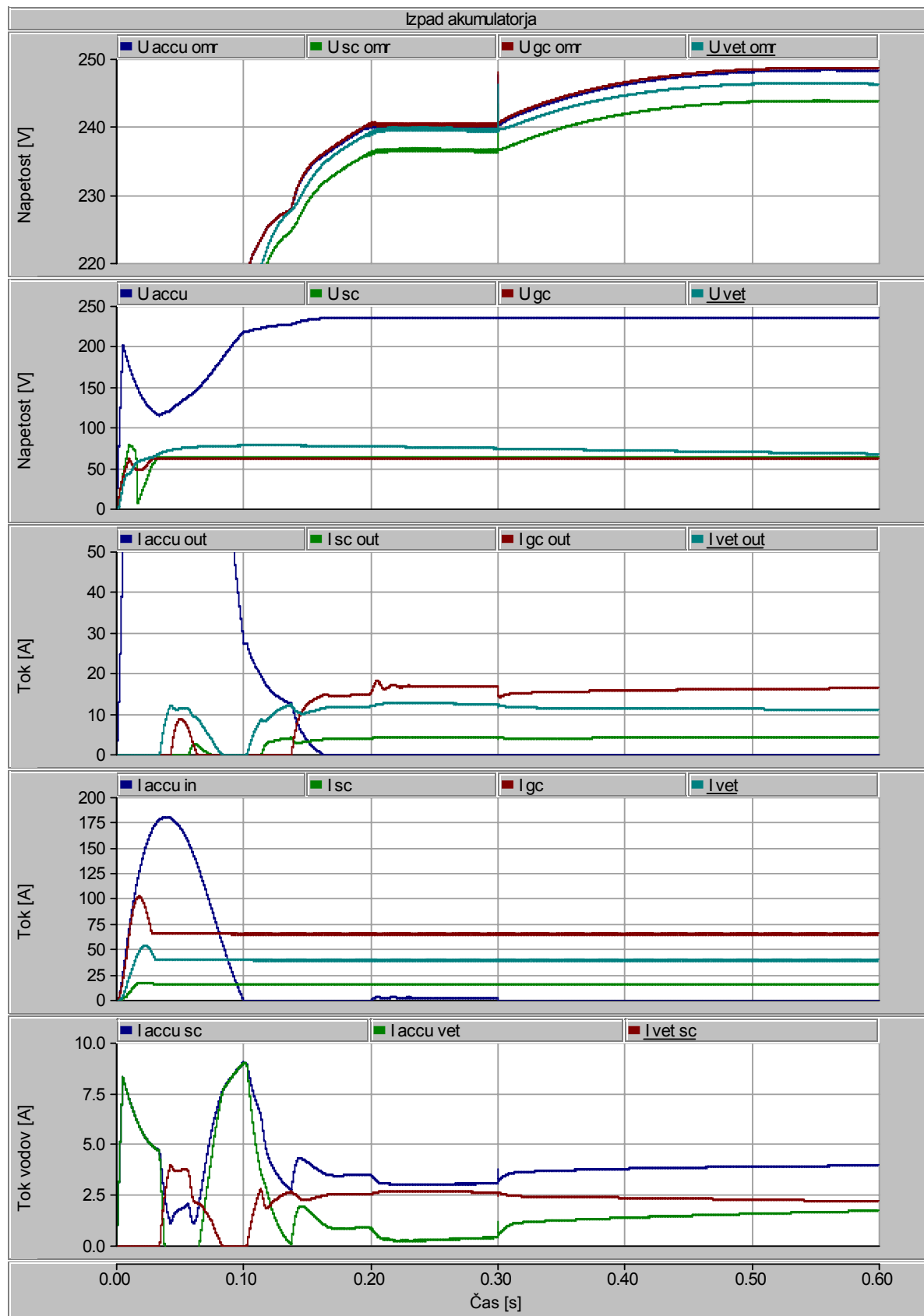
Tako je pri obratovanju omrežja ob izpadu akumulatorja možnih več stanj; pri majhni razliki med porabo in proizvodnjo se ta razlika lahko izniči z dopustnim zvišanjem ali znižanjem napetosti, kar pomeni povečevanje oz. zmanjševanje porabe.

Če je proizvodnja prevelika, da bi jo uskladili s porabo, je potrebno moč virov zmanjšati. Če pa je proizvodnja premajhna in napetost omrežja pade pod najnižjo dovoljeno, vire izključimo iz omrežja. Sl. 8.10 prikazuje rezultate digitalne simulacije omrežja, pri katerem pride v času $t = 0.3$ s po zagonu omrežja do izpada akumulatorja.

Iz rezultatov digitalne simulacije je razvidno sledeče:

1. Napetosti v različnih točkah omrežja se ob izpadu akumulatorja povečajo za približno 10 V, kar je posledica tega, da je bila proizvodnja pred izpadom le okrog 10 % večja od porabe. Pri zvišani napetosti se poraba in proizvodnja izenačita.
2. Napetosti posameznih virov se ob izpadu akumulatorja v primerjavi z normalnim obratovanjem omrežja, ki je opisano v poglavju 8.3.1, ne spremenijo.
3. Izhodni tokovi DC/DC pretvornikov se ob izpadu akumulatorja skočno zmanjšajo, kar je posledica prekinitve polnjenja akumulatorja. Po izpadu akumulatorja se tokovi skupaj z napetostmi zvišajo tako, da je moč virov konstantna.
4. Tokovi posameznih virov ostanejo nespremenjeni, tok polnjenja akumulatorja pa se prekine.
5. Tokovi vodov se povečajo. Ves presežek moči, ki se je iz gorivnih celic pred izpadom pretakal v akumulator, se po izpadu akumulatorja pretaka k porabniku pri sončnih celicah preko vseh treh vodov. Presežek moči veterne turbine se je z

zvišanjem napetosti zmanjšal, kar povzroči zmanjšanje toka med veterno turbino in sončnimi celicami.



Sl. 8.10: Rezultati digitalne simulacije pri izpadu akumulatorja

ZAKLJUČEK

V magistrskem delu je predstavljeno možno obratovanje izoliranega enosmernega nizkonapetostnega omrežja, ki je napajano iz obnovljivih virov. Viri so na omrežje priključeni v različnih točkah, kjer se nahaja tudi poraba – torej gre za razpršeno proizvodnjo. Tako omrežje lahko predstavlja alternativo izmeničnemu omrežju.

Glavna ugotovitev proučevanja je, da je obratovanje obravnavanega omrežja povsem možno. Uporabljeni so standardni elementi tako na strani proizvodnje kot na strani porabe. Pri obratovanju imajo glavno vlogo regulabilni DC/DC pretvorniki, ki regulirajo napetosti in pretoke moči v omrežju. Pri tem centralna regulacija ter komunikacija med posameznimi enotami ni potrebna.

V prvem delu smo podrobneje predstavili porabo. Glavni cilj proučevanja porabnikov je bil ugotoviti načine priklopa na enosmerno napetost za celoten spekter možnih porabnikov v gospodinjstvu, ki so v osnovi izdelani za priključitev na izmenično napetost. Ugotovili smo, da porabniki potrebujejo različne stopnje predelave; nekatere lahko na enosmerno napetost priključimo brez predelave, nekateri potrebujejo manjše ali večje predelave, nekatere pa lahko priključimo le preko DC/AC pretvornikov.

V osrednjem delu smo predstavili posamezne vire in njihove priključitve na omrežje. Kot se je izkazalo, je potrebno vire priključiti na omrežje preko DC/DC pretvornikov. Ti pretvorniki skrbijo za pravi pretok moči v omrežje in s tem za optimalno delovanje virov. Vsak od obravnavanih virov, to so sončne celice, vetrna turbina in gorivne celice, ima povsem specifične zahteve glede regulacije, ki jo izvaja DC/DC pretvornik, osnovni princip delovanja pa je za vse uporabljene DC/DC pretvornike zelo podoben. Prikazali smo modele posameznih virov in modele pripadajočih DC/DC pretvornikov skupaj z regulacijskim vezjem, ki smo jih izdelali za digitalno simulacijo omrežja s programom PS CAD / EMTDC. Za vsak DC/DC pretvornik smo podali poteke tokov in napetosti ob posameznih preklopih polprevodniškega stikala IGBT.

V nadaljevanju smo predstavili akumulacijo električne energije, ki jo predstavlja svinčev akumulator. Ugotovili smo več možnih načinov priklopa akumulatorja na omrežje. Za digitalno simulacijo omrežja smo izbrali način priklopa, kjer je akumulator pri napajanju omrežja priključen neposredno, pri polnjenju pa je na omrežje priključen preko DC/DC pretvornika, ki pri polnjenju vzdržuje konstantno napetost omrežja. Tak način predstavlja kompromis med stroški za DC/DC pretvornik in nihanjem napetosti omrežja v točki priklopa akumulatorja.

Sledi opis dimenzioniranja enosmernih povezovalnih vodov in hišne inštalacije ter stikalne in zaščitne opreme. Ugotovili smo, da je izvedba možna in da posamezni elementi za zaščito enosmernega omrežja obstajajo.

Kot glavni rezultat smo v zadnjem delu predstavili rezultate digitalne simulacije obravnavanega enosmernega omrežja, ki smo jo izvedli s programom PS CAD / EMTDC. Najprej so prikazani rezultati digitalne simulacije poenostavljenega modela, ki prikazujejo napetostne in tokovne razmere v omrežju tekom enega dneva. Rezultati potrjujejo naše predpostavke, da je obratovanje omrežja možno na ta način, da akumulator zagotavlja napetostno stabilnost, viri pa preko DC/DC pretvornikov v točki priklopa na omrežje vzpostavijo tako napetost, da proizvedena moč teče v omrežje. Sledi prikaz rezultatov digitalne simulacije detajlnega modela, ki prikazujejo napetosti in tokove v omrežju pri različnih prehodnih pojavih, kot so npr. zagon omrežja ali kratek stik na vodu z upoštevanjem delovanja zaščite. Ti rezultati potrjujejo pravilnost delovanja predpostavljenih modelov virov in DC/DC pretvornikov in podpirajo našo glavno ugotovitev, da je obratovanje enosmernega izoliranega omrežja z razpršeno proizvodnjo iz obnovljivih virov povsem možno brez centralne regulacije in komunikacije med posameznimi enotami.

Nadaljnje delo bomo najprej usmerili v ekonomsko primerjavo obravnavanega enosmernega omrežja z izmeničnim omrežjem. Med proučevanjem obravnavanega omrežja se je pokazala tudi možnost obratovanja brez akumulacije, zato bi v nadaljnjem delu bilo smiselno proučiti tudi ta način obratovanja.

LITERATURA

- [1] Willis H. L., Scott W. G.: Distributed Power Generation, *Marcel Dekker Inc.*, New York, 2000.
- [2] <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/99/99fuelcell/fc4-2.pdf>,
- [3] http://www.senertec.de/show_pdf.php?name=englisch,
- [4] <http://www.gorenje.si/>
- [5] <http://www.lth.si/>
- [6] http://www.toshiba-aircon.com/jp/about/technology/dc_twin.htm
- [7] <http://www.bcaust.com.au/micro.htm>
- [8] <http://www.solar-baumeister.de/electry/camping-.htm>
- [9] P. Drenovec: Direktni pretvorniki energetske elektronike, zaključna naloga, *Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*, 2002
- [10] http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/design_center/articles/DC-DC/converter.shtm
- [11] http://www.ipes.ethz.ch/ipes/dcdc/e_Boost.html
- [12] Skaale I. et al: The development of a new maximum power point tracker for a very high efficiency, compound curve photovoltaic array for a solar powered vehicle, *Renewable Energy*, Vol. 22, No. 1-3, pp 295-302, January-March 2001.
- [13] Hua C. , Lin J.: An on-line MPPT algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays, *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 7, pp 1129-1142, June 2003.
- [14] Nafeh Abd El-Shafy A.: Evaluation of a proper controller performance for maximum-power point tracking of a stand-alone PV system, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 75, No. 3-4, pp 723-728, February 2003,
- [15] http://www.hta-bi.bfh.ch/E/induel/r_and_d/MPPTnG/MPPTnG.html,
- [16] <http://www.elecdesign.com/1998/sept1498/ifd/2IFD.pdf>
- [17] http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/710

- [18] http://www.datel-europe.com/en/download/application_notes/6-29_6-45.pdf
- [19] P. Gipe, Wind energy basics, *Chelsea Green Publishing Company*, USA, 1999.
- [20] Sokolov E., Rizov P.: An analysis of a directly driven PM wind generator, *Flux magazine*, No. 34, CERDAT, March 2001.
- [21] <http://www.suntara.com/catalog/proven2500.html>
- [22] A. Dolenc, Sinhronski stroji, *Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*, 1977.
- [23] Tan K., Islam S.: Mechanical sensorless robust control of wind turbine driven permanent magnet synchronous generator for maximum power operation, *International journal of renewable energy engineering*, Vol. 3, No. 3, December 2001.
- [24] <http://www.eoltec.com/Documents/WindRunner%20V01-eng.pdf>
- [25] Hanžič A., Voršič J., Gorivne celice – pogonsko sredstvo prihodnosti, *Učinkovito z energijo*, let. 7, št. 4, December 2002.
- [26] Makuc M.: Solarni sistem za oskrbo stanovanjskega objekta na področju primorja z električno energijo, zaključna naloga, *Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*, Ljubljana, 2001,
- [27] <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT78.htm>
- [28] De Francesco M., Arato E.: Start-up analysis for automotive PEM fuel cell systems, *Journal of Power Sources*, Vol. 108, No. 1-2, pp 41-52. June 2002.
- [29] Mallant R. K. A. M.: PEMFC systems: the need for high temperature polymers as a consequence of PEMFC water and heat management, *Journal of Power Sources*, In Press, Corrected Proof, Available online 25 March 2003.
- [30] Dokiya M.: SOFC system and technology, *Solid State Ionics*, Vol. 152-153, pp 383-392, December 2002.
- [31] Sammes N. M., Boersma R.: Small-scale fuel cells for residential applications, *Journal of Power Sources*, Vol. 86, No. 1-2, pp 98-110, March 2000. and
- [32] Nakagawa N., Xiu Y.: Performance of a direct methanol fuel cell operated at atmospheric pressure, *Journal of Power Sources*, In Press, Corrected Proof, Available online 8 April 2003.
- [33] <http://www.rcub.bg.ac.yu/~todorom/tutorials/rad24.html>

- [34] Susai T. et al: Development of a 1 kW PEM fuel cell power source, *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 3, No. 29, pp 7-11, February 2001.
- [35] <http://www.e2i.org/docs/1001080.pdf>.
- [36] Heidebrecht P., Sundmacher K.: Molten carbonate fuel cell (MCFC) with internal reforming: model-based analysis of cell dynamics, *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, No 3-6, pp 1029-1036, February-March 2003.
- [37] Hamelin J. et al: Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26, No. 6, pp 625-629, June 2001.
- [38] <http://www.rebresearch.com/Me/Me100paper.html>
- [39] http://powerelectronics.com/ar/power_dc_dc_converters_condition/
- [40] Armenta-Deu C.: Prediction of battery behaviour in SAPV applications, *Renewable Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online 1 April 2003.
- [41] <http://www.homepower.com/files/battvoltandsoc.pdf>
- [42] Blomgren G. E.: Liquid electrolytes for lithium and lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, In Press, Corrected Proof, Available online 16 April 2003.
- [43] Galloway R. C., Haslam S.: The ZEBRA electric vehicle battery: power and energy improvements, *Journal of Power Sources*, Vol. 80, No. 1-2, pp 164-170, July 1999,
- [44] Ratnakumar B. V. et. al.: Simulation of temperature-compensated voltage limit curves for aerospace Ni-Cd batteries using a first principles' model, *Journal of Power Sources*, Vol. 63, No. 2, pp 157-165, December 1996,
- [45] Paish O.: Small hydro power: technology and current status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, No. 6, pp 537-556, December 2002.
- [46] <http://www.almac.co.uk/proven/>
- [47] http://solarwindworks.com/Products/Micro_Hydro/micro_hydro.htm
- [48] http://www.independent-power.com/small_hydro1.html
- [49] http://www.absak.com/cgi-bin/shop/search.cgi?user_id=id&database=db_main.txt&template=category.htm&2_option=1&2=water&3_option=1&3=unit&5_option=3&5=impulse

- [50] <http://www.netc.net.au/platypus/>
- [51] <http://www.fkz.co.yu/>
- [52] <http://www.framat.si/>
- [53] Priročnik kablov podjetja OEKW, Avstrija, Dunaj 1995
- [54] [http://138.227.174.121/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/49AF1BE5ED9B3D19C1256CE90044C591/\\$File/2CDC421001D0201.pdf](http://138.227.174.121/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/49AF1BE5ED9B3D19C1256CE90044C591/$File/2CDC421001D0201.pdf)
- [55] http://www.siemens-industry.co.uk/distribution/beta_personal.asp
- [56] T. Kuček, Sistem za avtonomno oskrbo planinske kočice z električno energijo, zaključna naloga, *Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*, 2001.

IZJAVA

Podpisani Valentin Ažbe, rojen 18.9.1971 v Kranju izjavljam, da sem magistrsko delo z naslovom 'Enosmerna porabniška omrežja z razpršeno proizvodnjo iz obnovljivih virov' izdelal sam pod mentorstvom prof. dr. Rafaela Mihaliča in somentorstvom prof. dr. Dušana Povha. Pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Valentin Ažbe