

Dimenzioniranje sustava za proizvodnju električne energije iz visinskih vjetrova baziranog na Magnusovom efektu

Burić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:279795>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Burić

Zagreb, godina 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Ivan Burić

Zagreb, godina 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem **prof.dr.sc. Nevenu Duiću** i docentu **dr.sc. Luki Perkoviću** na stručnoj i nesebičnoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

Ivan Burić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 24-02-2016 Prilog
Klasa: 602-04/16-613
Ur.broj: 15-1703-16-52

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Ivan Burić

Mat. br.: 0035182924

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dimenzioniranje sustava za proizvodnju električne energije iz visinskih vjetrova baziranog na Magnusovom efektu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Dimensioning of a system for power production from high altitude winds based on Magnus' effect**

Opis zadatka:

Postrojenje za dobivanje energije iz visinskih vjetrova, baziran na Magnusovom efektu izrazito je diskontinuiran proces zbog postojanja dviju odvojenih faza proizvodnje i potrošnje energije. Omjer energija dviju faza je otprilike 3/4, što znači da je neto dostupna energija za elektroenergetsku (EE) mrežu 75% energije proizvedene u prvoj fazi. S obzirom na zahtjeve za čim stabilnijom predajom električne energije u EE mrežu, diskontinuitet u proizvodnji je moguće smanjiti na dva načina: (1) korištenjem većeg broja pojedinačnih vjetroelektrana u vjetroparku ili (2) korištenjem spremnika energije

U sklopu ovog zadatka je potrebno provesti računalne simulacije u kojima treba pronaći sljedeće dimenzije sustava:

- instaliranu nominalnu snagu i broj pojedinačnih jedinica za dobivanje energije (dimenzije letjelice te snagu generatora)
- kapacitet i snagu spremnika energije u zemaljskoj stanici (koji može biti baterija, ultrakondenzator, zamašnjak)

s obzirom na izračunate ekonomske parametre za sljedeće zadane nazivne snage na ulazu u EE mrežu: 50kW, 500kW i 5MW, uz dopušteno odstupanje od nazivne snage u vrijednosti od maksimalno 5%.

Sva literatura, modeli te ulazni podaci za analizu slučaja će biti dostupni od strane mentora i neposrednog voditelja, a to su prije svega: model vjetroelektrane na visinske vjetrove uz model punjenja/pražnjenja spremnika energije (*in-house* model razvijen unutar FSB-a u sklopu projekta HAWE), ulazni profili i vremenska distribucija vjetra, procjena cijena komponenata sustava za proizvodnju i pohranu energije. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:
1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. DEFINICIJA PROBLEMA	5
3. MATEMATIČKI MODEL.....	7
4. ANALIZA REZULTATA	10
5. EKONOMSKI PARAMETRI	31
6. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	38

POPIS SLIKA

Slika 1.	Porast iskorištavanja obnovljivih izvora energije	1
Slika 2.	Porast udjela energije vjetra u iskorištavanju obnovljivih izvora energije	1
Slika 3.	Teorijski profil brzina vjetra na različitom reljefu	2
Slika 4.	Ovisnost gustoće snage vjetra o visini izražena u kW/m ²	2
Slika 5.	Magnusov efekt	3
Slika 6.	Skica postrojenja za iskorištavanje visinskih vjetrova pomoću Magnusovog efekta	4
Slika 7.	Raspodjela snage po vremenu jednog ciklusa	5
Slika 8.	Jedna veća jedinica sa spremnikom energije	5
Slika 9.	Više manjih postrojenja koje rade uz određeni fazni pomak	6
Slika 10.	Više manjih jedinica uz spremnik energije	6
Slika 11.	Prikaz sila na balon u fazi proizvodnje	7
Slika 12.	Prikaz sila na balon u fazi oporavka	8
Slika 13.	Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s jednom većom jedinicom	11
Slika 14.	Ponašanje baterije za slučaj postrojenja s jednom većom jedinicom	12
Slika 15.	Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s više manjih jedinica ...	13
Slika 16.	Ponašanje baterije za slučaj postrojenja s više jedinica	14
Slika 17.	Ponašanje baterije čiji je kapacitet jednak trećini početnog kapaciteta	14
Slika 18.	Raspodjela snage za postrojenje sa 7 serijskih i 3 paralelno spojene jedinice	15
Slika 19.	Ponašanje baterije za postrojenje sa 7 serijski i 3 paralelno spojene jedinice	15
Slika 20.	Trajektorija zračnog balona	15
Slika 21.	Raspodjela snage za postrojenje sa jednom velikom jedinicom i spremnikom energije	17
Slika 22.	Ponašanje baterije 10 puta većeg kapaciteta u postrojenju s jednom velikom jedinicom	17
Slika 23.	Ponašanje baterije 100 puta većeg kapaciteta u postrojenju s jednom velikom jedinicom	18
Slika 24.	Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s više manjih jedinica ...	19
Slika 25.	Detalj s dijagrama raspodjele snage po vremenu sa slike 24.	19
Slika 26.	Trajektorija zračnog balona	20
Slika 27.	Raspodjela snage za postrojenje sa 4 serijske i 37 paralelno spojenih jedinica ...	21
Slika 28.	Ponašanje baterije zadanih karakteristika za postrojenje od 4 serijske i 37 paralelnih jedinica	21
Slika 29.	Ponašanje baterije 10 puta većeg kapaciteta u postrojenju sa 4 serijske i 37 paralelnih jedinice	22
Slika 30.	Trajektorija zračnog balona	22
Slika 31.	Raspodjela snage za postrojenje sa jednom velikom jedinicom i spremnikom energije	23
Slika 32.	Stupanj napunjenosti baterije zadanog kapaciteta	24
Slika 33.	Stupanj napunjenosti baterije kapaciteta 1000 puta većeg od zadanog	24
Slika 34.	Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s više manjih jedinica ...	25
Slika 35.	Detalj s dijagrama raspodjele snage po vremenu sa slike 34. – maksimalna snaga	26
Slika 36.	Detalj s dijagrama raspodjele snage po vremenu sa slike 34. – minimalna snaga	26
Slika 37.	Trajektorija zračnog balona	27
Slika 38.	Raspodjela snage po vremenu za postrojenje s više manjih jedinica i spremnikom energije	28

Slika 39.	Ponašanje baterije početnih karakteristika za postrojenje od 12 serijskih i 117 paralelnih jedinica	28
Slika 40.	Ponašanje baterije 10 puta većeg kapaciteta u postrojenju sa 12 serijskih i 117 paralelnih jedinica	29
Slika 41.	Ponašanje baterije 50 puta većeg kapaciteta u postrojenju sa 12 serijskih i 117 paralelnih jedinica	29
Slika 42.	Trajektorija zračnog balona.....	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ulazne varijable modela i njihove oznake	7
Tablica 2. Regulacijske konstante korištene u matematičkom modelu.....	9
Tablica 3. Ulazne varijable za slučaj s jednom većom jedinicom i spremnikom energije.....	11
Tablica 4. Ulazne varijable za slučaj s više manjih jedinica pomaknutih u fazu	13
Tablica 5. Ulazne varijable za slučaj s jednom većom jedinicom i spremnikom energije.....	16
Tablica 6. Ulazne varijable za slučaj s više manjih jedinica koje rade uz fazni pomak.....	18
Tablica 7. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s više manjih jedinica i spremnikom energije	20
Tablica 8. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s jednom većom jedinicom i spremnikom energije	23
Tablica 9. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s više manjih jedinica koje rade uz određeni fazni pomak	25
Tablica 10. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s više manjih jedinica i spremnikom energije	27
Tablica 11. Ulazni podaci za računanje ekonomskih parametara	31
Tablica 12. Usporedba svih mogućih postrojenja	35

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
δ	[W/m ²]	gustoća snage sadržane u vjetru
ρ	[kg/m ³]	gustoća zraka
w	[m/s]	brzina vjetra
F_L	[N]	sila uzgona
F_D	[N]	sila otpora kretanju tijela kroz fluid
F	[N]	ukupna sila na zračni balon
D_{abm}	[m]	promjer zračnog balona
L_{abm}/D_{abm}	[-]	omjer duljine i promjera zračnog balona
L_k	[m]	duljina kabla koji spaja zračni balon i vitlo
P_{grid}	[W]	snaga koju postrojenje predaje EE mreži
n_{ser}	[-]	broj serijski spojenih jedinica koje rade uz fazni pomak
n_{par}	[-]	broj paralelno spojenih jedinica koje rade istovremeno
F_{cable}	[N]	sila u kablu
$F_{x_{cable_{prod}}}(t)$	[N]	trenutna sila u kablu u fazi proizvodnje u smjeru osi x
$w_{rel}(t)$	[m/s]	trenutna razlika brzine zračnog balona i brzine užeta
$K_{produce}$	[-]	konstanta koja osigurava da brzina užeta koje se odmotava bude u zadanoj granici u fazi proizvodnje
x_{rel}	[m]	trenutna razlika x-koordinate zračnog balona i početne x-koordinate zračnog balona
$F_{L_x}(t)$	[N]	trenutna sila uzgona u smjeru osi x
C_L	[-]	koeficijent uzgona
A_{proj}	[m ²]	projekcijska površina zračnog balona
$u_{x_{rel}}$	[m/s]	razlika brzine vjetra i brzine zračnog balona u smjeru osi x
$F_{D_x}(t)$	[N]	trenutna sila otpora u smjeru osi x
C_D	[-]	koeficijent otpora
$a_x(t)$	[m/s ²]	trenutno ubrzanje zračnog balona u smjeru osi x
$F_x(t)$	[N]	trenutna ukupna sila na zračni balon u smjeru osi x
m_{abm}	[kg]	masa zračnog balona
$w_x(t)$	[m/s]	trenutna brzina zračnog balona u smjeru osi x
t_{res}	[s]	vremenski korak korišten u ovoj simulaciji
t	[s]	vrijeme
$x(t)$	[m]	trenutni položaj zračnog balona u smjeru osi x
$P_{prod}(t)$	[W]	trenutna proizvedena snaga
$P_{rec}(t)$	[W]	trenutna utrošena snaga
$F_{cable_{rec}}(t)$	[N]	trenutna sila u kablu u fazi oporavka

$C_1(t)$	[kg/s ²]	trenutni koeficijent u fazi oporavka koji u sebi sadrži podatke o veličini i smjeru sile
$F_{xcablerec}(t)$	[N]	trenutna sila u kablju u smjeru osi x u fazi oporavka
$F_{ycablerec}(t)$	[N]	trenutna sila u kablju u smjeru osi y u fazi oporavka
$C(t)$	[kg/s ²]	trenutni koeficijent u fazi oporavka koji u sebi sadrži podatke o iznosu i smjeru brzine
K_{pull}	[-]	konstanta pri spuštanju zračnog balona u području od najveće visine zračnog balona do granice od 1500 m razlika x-koordinate zračnog balona u prethodnom trenutku i početne x-koordinate
$K_{recover}$	[-]	konstanta pri spuštanju zračnog balona u području od 1500 m visine do početne visine ciklusa
$P_{netto_1}(t)$	[W]	trenutna ukupno proizvedena snaga u jednoj seriji jedinica
$P_{netto_{tot}}(t)$	[W]	trenutna ukupno proizvedena snaga u cijelom postrojenju
NPV	[kn]	neto trenutna vrijednost
n	[-]	broj perioda (godina)
N	[-]	ukupan broj perioda rada postrojenja
C_n	[kn]	tok novca
r	[-]	diskontna stopa
I_n	[kn]	investicijski trošak u godini n
M_n	[kn]	trošak popravaka i održavanja u godini n
F_n	[kn]	trošak goriva u godini n
E_n	[kWh]	električna energija proizvedena u godini n

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je postupak dimenzioniranja sustava za proizvodnju električne energije iz visinskih vjetrova baziranog na Magnusovom efektu. Dimenzioniranje sustava vrši se računalnim simuliranjem procesa postrojenja koristeći matematički model koji je iskodiran u programskom jeziku MATLAB. Poseban naglasak stavljen je na uvjet stabilnosti predaje električne energije u elektroenergetsku mrežu. U prvom dijelu rada opisani su teoretski razlozi koji objašnjavaju motivaciju za iskorištavanje energije visokih vjetrova te su dane teoretske osnove načina na koji funkcionira postrojenje za proizvodnju električne energije s pomoću Magnusovog efekta. Definiran je i problem koji se veže uz simuliranje procesa ovakvog postrojenja te su objašnjeni osnovni fizikalni zakoni korišteni u matematičkom modelu.

U drugom dijelu rada izloženi su rezultati simulacija na osnovu kojih se moglo zaključiti o mogućnosti realiziranja različitih vrsta dimenzioniranja sustava. Za uspješno zaključivanje bilo je potrebno pratiti rezultate prikazane na dijagramima. Dijagrami prikazuju raspodjelu snage po vremenu, kretanje stupnja napunjenosti baterije u vremenu te trajektoriju zračnog balona ovog postrojenja. U posljednjem dijelu dan je izračun određenih ekonomskih parametara kako bi se mogla dati procjena o isplativosti određenog postrojenja.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, visoki vjetrovi, Magnusov efekt, MATLAB, računalne simulacije, IRR, LCOE

SUMMARY

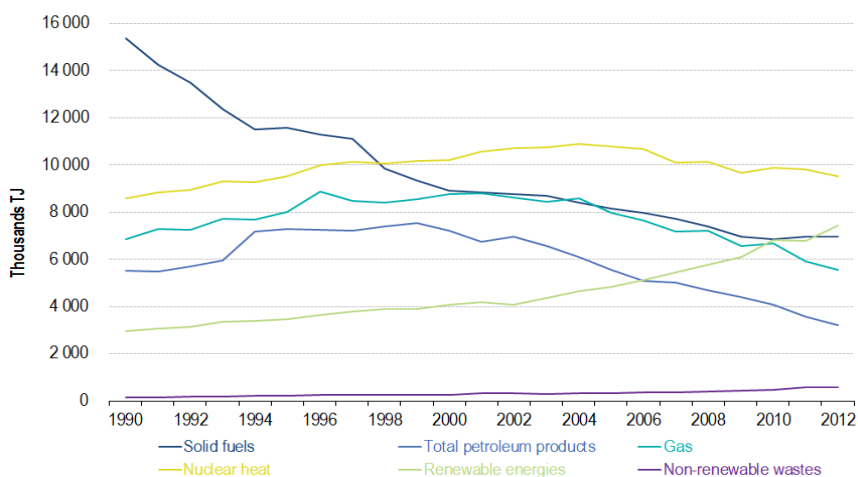
In this paper an example of dimensioning an electricity production system based on Magnus effect has been demonstrated. Such system transforms kinetic energy of high altitude winds to mechanical energy by exploiting Magnus effect on airborne rotating cylinder. Dimensioning of system is done by simulating a systems processes using mathematical model coded in MATLAB. A stability of electricity transfer from system to grid has been the most important condition for successful dimensioning. In the first part of the paper the theoretical background has been given with the purpose of describing a motivation for exploiting a high altitude winds energy and basic principles of such systems operations. A problem of simulating Magnus effect system has been defined and basic laws of physic used in the mathematical model have been described.

In the second part of the paper results of simulations have been presented. Based on those results, it is possible to make a conclusion about acceptable dimensions of the system. To make a conclusion, it was necessary to track results of simulations shown on various diagrams. Diagrams present a power distribution in time, fluctuations of condensers state of charge and trajectory of airborne module. At the end, some economic parameters were calculated so that an estimation of systems profitability could be given.

Key words: renewable energy sources, high altitude wind energy, Magnus effect, MATLAB, computer simulations, IRR, LCOE

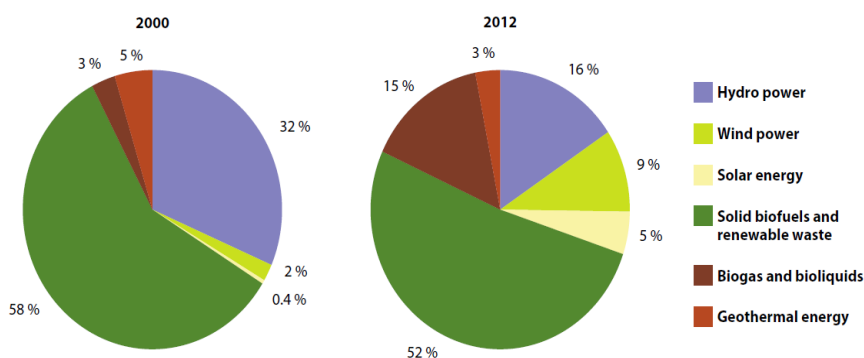
1. UVOD

Ljudska civilizacija je u neprestanom porastu te samim time raste i potreba za energijom. Većina energetske potrebe zadovoljava se energijom iz neobnovljivih izvora energija što sa sobom vuče i brojne klimatske promjene kojima smo svjedoci [1]. Budući da je prepoznat utjecaj ljudske civilizacije na klimu i okoliš, raste iskorištavanje energije iz obnovljivih izvora energije kao što su energija vode, Sunca, vjetra i sl [2].



Slika 1. Porast iskorištavanja obnovljivih izvora energije

Subvencije za iskorištavanje obnovljivih izvora energije te takse za emisije ugljikovog dioksida doprinose razvoju tehnologija obnovljivih izvora energije [3]. Iskorištavanje energije vjetra je uz iskorištavanje Sunca najbrže rastuća tehnologija obnovljivih izvora energije [4].



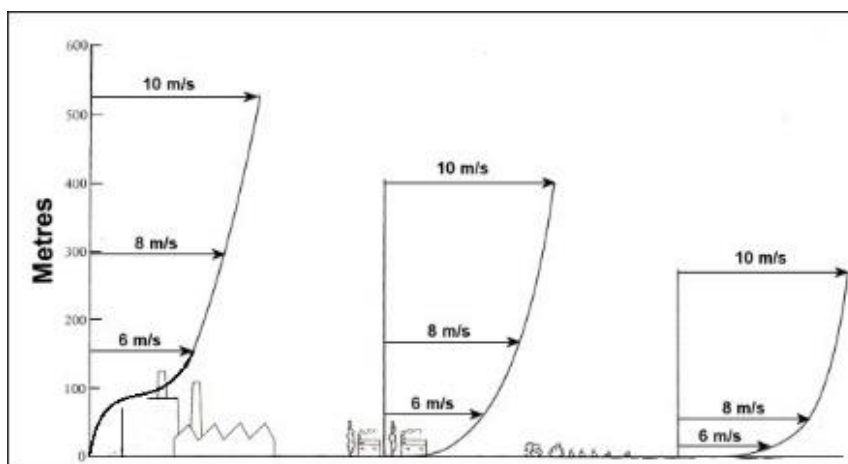
Slika 2. Porast udjela energije vjetra u iskorištavanju obnovljivih izvora energije

Vjetroelektrane su postrojenja u kojima se energija vjetra transformira u električnu energiju. Energija vjetra je transformirani oblik sunčeve energije. Sunce neravnomjerno zagrijava različite dijelove Zemlje što uzrokuje različite tlakove zraka na tim mjestima. Zbog težnje za izjednačavanjem tlakova dolazi do strujanja zraka te tako nastaje vjetar [5]. Otprilike 1 do 2 %

sunčeve energije se transformira u energiju vjetra [6]. Prednosti vjetroelektrana su u tome što ne zagađuju okoliš, nemaju troškova za gorivo te im je visoka pouzdanost rada postrojenja. Nedostaci vjetroelektrana su visoki troškovi izgradnje i promjenjivost brzine vjetra zbog koje vjetroelektrane ne mogu jamčiti isporuku energije kad god je ona potrebna [7].

1.1. Motivacija za iskorištavanje energije visinskih vjetrova

Nestalnost brzine vjetrova posebno je izražena kod vjetrova koji pušu na malim visinama iznad kopna. Uzrok tomu je reljef koji svojom geometrijom uzrokuje različite turbulencije u strujanju vjetra. S visinom strujanje vjetra postaje ujednačenije, stabilnije i brže [8].

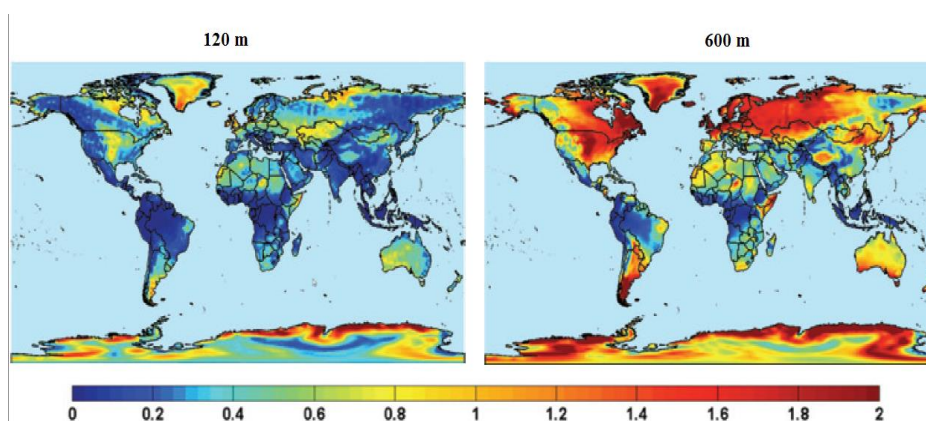


Slika 3. Teorijski profil brzina vjetra na različitom reljefu

Količina snage koju se može transformirati u vjetroturbinama funkcija je brzine vjetra i gustoće zraka. Brzina vjetra raste s porastom visine, a gustoća zraka opada. Faktor koji uzima u obzir obje veličine naziva se gustoća snage [9] i izračunava se jednadžbom (1).

$$\delta = \frac{1}{2} \rho w^3 \quad (1)$$

Gustoća snage vjetra izražava se u W/m^2 . Ona također raste s porastom visine što se vidi na slici 4. [10].



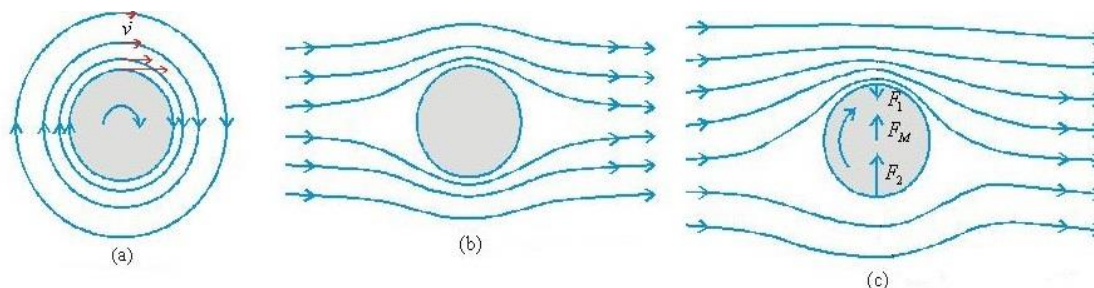
Slika 4. Ovisnost gustoće snage vjetra o visini izražena u kW/m^2

S obzirom da je gustoća snage visinskih vjetrova i do nekoliko puta veća od gustoće snage niskih vjetrova, jasna je motivacija za iskorištavanje njihove energije.

Dodatni razlozi za iskorištavanje energije visinskih vjetrova, osim činjenice da su pogonski vjetrovi puno brži i stalniji od onih nizinskih, su činjenica da takvi sustavi ne zahtijevaju skupe građevinske radove te im je potrebno mnogo manje materijala za njihovo realiziranje što utječe na manju jediničnu cijenu instalirane snage u odnosu na konvencionalne vjetro turbine [11].

1.2. Magnusov efekt

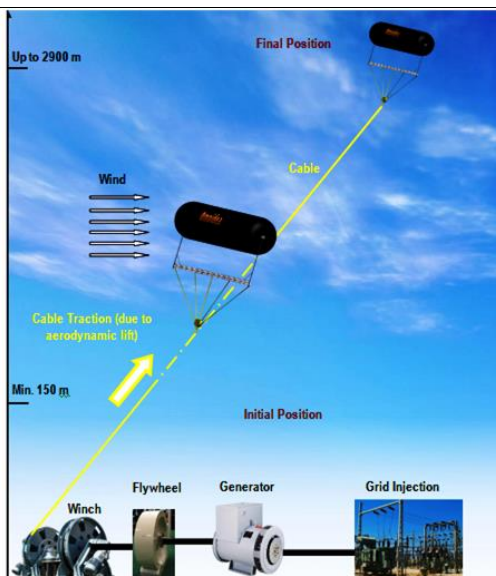
Ako tijelo rotira u struji fluida, na njega djeluje sila okomito na smjer strujanja. Ta pojava naziva se Magnusov efekt [12]. Na slici 5. prikazan je valjak smješten u fluidu. Ako valjak rotira u mirnom fluidu (slika 5.a), strujnice su koncentrirane kružnice oko valjka. Zbog viskoznosti će čestice fluida oko valjka također rotirati brže što su bliže valjku, a sloj fluida uz valjak imat će istu obodnu brzinu kao i valjak. Ako valjak ne rotira u laminarnom strujanju fluida, strujnice su oblika kao na slici 5.b. Ako valjak rotira u laminarnom strujanju fluida, strujnice izgledaju kao na slici 5.c. Brzina strujanja je veća iznad valjka jer se smjerovi gibanja fluida i valjka podudaraju, a manja ispod valjka gdje su smjerovi tih gibanja suprotni. Zbog veće brzine strujanja iznad valjka tlak je manji nego ispod valjka gdje je i manja brzina te se javlja rezultantna sila prema gore (F_M na slici 5.c).



Slika 5. Magnusov efekt

1.3. Sustav za dobivanje energije iz visinskih vjetrova baziran na Magnusovom efektu

Postrojenje za dobivanje energije iz visinskih vjetrova bazirano na Magnusovom efektu sastoji se od zemaljskog postrojenja i lebdeće jedinice koji su povezani kabelom (slika 6.). Zemaljsko postrojenje čine vitlo na koje je namotan kabel, motor-generator, spremnik energije i priključak na elektroenergetsku mrežu. Lebdeća jedinica sastoji se od valjkastog balona punjenog helijem, dva elektromotora te okvira koji to sve drži na okupu [13].

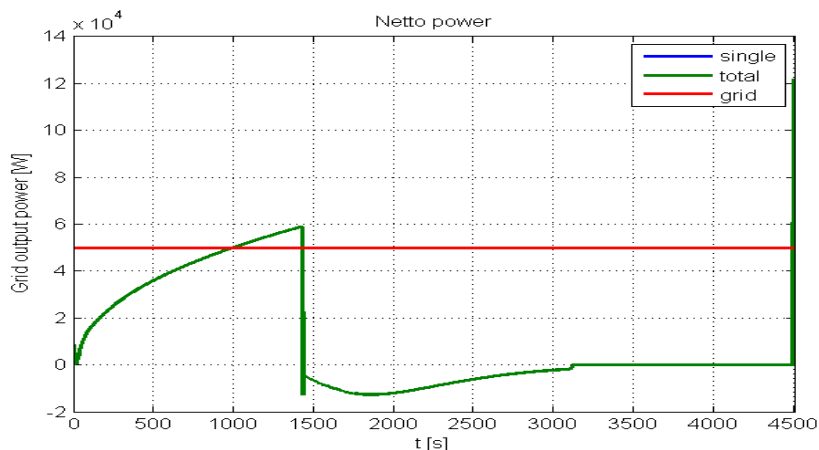


Slika 6. Skica postrojenja za iskorištavanje visinskih vjetrova pomoću Magnusovog efekta

Postrojenje koristi Magnusov efekt za pretvorbu električne energije iz energije vjetrova na sljedeći način. Elektromotori pokreću rotaciono gibanje valjkastog balona te se usred gibanja vjetra na balon javlja vertikalna sila prema gore (F_L) koja u kombinaciji sa silom koja nastaje kao posljedica otpora kretanju balona u fluidu (F_D) daje resultantnu silu koja gura balon u određenom smjeru (F). Balon svojim kretanjem povlači kabel za sobom, te ga odmotava s vitla na kojem je namotan taj kabel. Odmotavanje kabla s vitla uzrokuje rotaciju vitla koje je čvrstom vezom vezano na rotor generatora te generator na taj način mehaničku energiju rotacije vitla pretvara u električnu energiju. Taj dio procesa naziva se faza proizvodnje (*production phase*) i traje sve dok elektromotori rotiraju balon, odnosno dok balon odmotava kabel s vitla. Drugi dio procesa zove se faza vraćanja u prvobitni položaj (*recovery phase*). Kad regulacija prepozna da se balon približio unaprijed određenoj maksimalnoj visini, elektromotori prestaju rotirati balon. Zbog toga se smanjuje sila uzgona (F_L) te balon prestaje odmotavati kabel s vitla. Generator se prebacuje iz faze proizvodnje energije u fazu gdje funkcioniра kao elektromotor, odnosno gdje on dio stvorene električne energije pretvara u rotaciju svog vratila usmjerenu suprotno od smjera okretanja u fazi proizvodnje. Vratilo motor-generatora rotira vitlo pa ono namotava kabel nazad na sebe te time spušta balon na početnu visinu. Snaga koja se utroši na namotavanje užeta i spuštanje balona manja je od snage koja se dobije dizanjem balona i odmotavanjem užeta te se na taj način ostvaruje pozitivna bilanca sustava [14].

2. DEFINICIJA PROBLEMA

S obzirom da se jedan ciklus ovakvog sustava za dobivanje energije iz visinskih vjetrova sastoji od dva odvojena dijela (faza proizvodnje i faza potrošnje energije) raspodjela dobivene snage po vremenu nije prihvatljiva za implementiranje ovakvog sustava u električnu (EE) mrežu. Slika 7. prikazuje jednu tipičnu raspodjelu snage po vremenu za jedan ciklus.

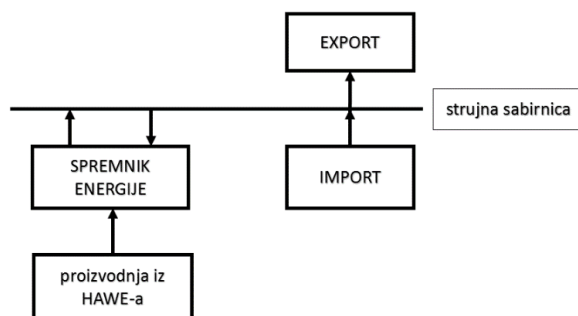


Slika 7. Raspodjela snage po vremenu jednog ciklusa

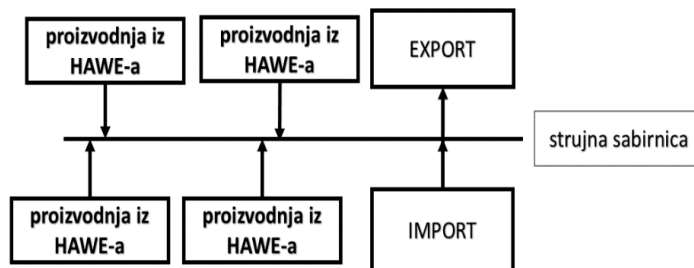
Zadatak kojim se bavi ovaj rad je upravo u tome – iznaći tehničko rješenje kojim je moguće prilagoditi postrojenje zahtjevima EE mreže na način da sustav bude u stanju razviti nazivne snage na ulazu u EE mrežu od 50 kW, 500 kW i 5 MW, uz dopušteno vremensko odstupanje od nazivne snage u vrijednosti od maksimalno 5%.

Predviđa se da je sustav moguće prilagoditi zahtjevima na tri načina. To su:

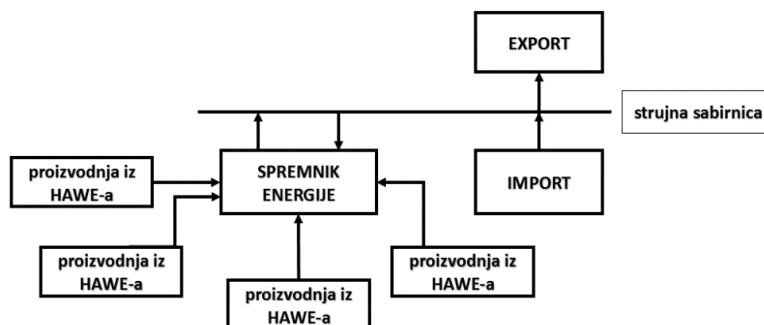
- velika jedinica postrojenja sa spremnikom energije (slika 8.)
- više manjih postrojenja bez spremnika energije koje rade uz određeni fazni pomak (slika 9.)
- više manjih postrojenja sa spremnikom energije (slika 10.)



Slika 8. Jedna veća jedinica sa spremnikom energije



Slika 9. Više manjih postrojenja koje rade uz određeni fazni pomak



Slika 10. Više manjih jedinica uz spremnik energije

Potrebno je provesti računalne simulacije kako bi se pronašao optimalan način projektiranja postrojenja. Potrebno je odrediti broj pojedinačnih jedinica, instaliranu nominalnu snagu svake, snagu generatora te kapacitet i snagu spremnika energije koji može biti baterija, ultrakondenzator ili zamašnjak.

3. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model korišten za simuliranje procesa u ovom završnom radu kodiran je u programskom jeziku MATLAB. Razvijen je unutar FSB-a za potrebe projekta HAWE [15]. Model je relativno jednostavan te se koristi osnovnim fizikalnim zakonima kako bi proveo simulaciju.

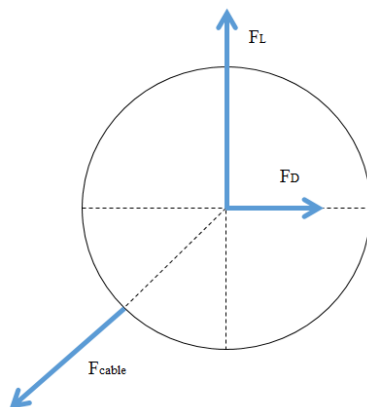
Ulazne varijable ovog modela prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Ulazne varijable modela i njihove oznake

Ulazne varijable modela	Oznaka varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}

S obzirom da postrojenje radi u dvije odvojene faze, fazi proizvodnje i fazi oporavka, fizikalni procesi se razlikuju te model to uzima u obzir. U fazi proizvodnje na balon djeluju sljedeće sile:

- sila otpora u užetu F_{cable}
- sila uzgona F_L
- sila otpora kretanju tijela kroz fluid F_D



Slika 11. Prikaz sila na balon u fazi proizvodnje

Matematički model svaku od njih rastavlja na dvije komponente, u smjeru osi X i Y.

Model svaku od njih računa prema sljedećim jednadžbama:

$$F_{x_{cable_{prod}}}(t) = w_{rel}(t) * K_{produce} * x_{rel} \quad (2)$$

$$F_{L_x}(t) = \frac{1}{2} * C_L * \rho * A_{proj} * u_{x_{rel}}^2 \quad (3)$$

$$F_{D_x}(t) = \frac{1}{2} * C_D * \rho * A_{proj} * u_{x_{rel}}^2 \quad (4)$$

Nakon što izračuna ukupnu silu u smjeru osi x, model računa akceleraciju, brzinu i poziciju balona koristeći se sljedećim jednadžbama:

$$a_x(t) = \frac{F_x(t)}{m_{abm}} \quad (5)$$

$$w_x(t) = w_x(t - 1) + a_x(t) * t_{res} \quad (6)$$

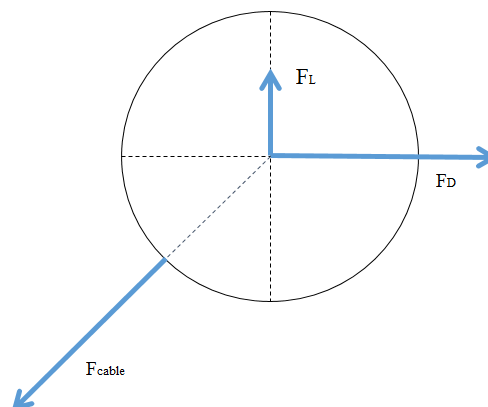
$$x(t) = x(t - 1) + w_x(t) * t_{res} \quad (7)$$

Analogne jednadžbe korištene su za računanje sila, akceleracije, brzine i pozicije u smjeru osi y.

Nakon što izračuna te podatke, model računa snagu proizvedenu u fazi proizvodnje koristeći jednadžbu (8)

$$P_{prod}(t) = \sqrt{\left(F_{x_{cable_{prod}}}(t) * w_x(t)\right)^2 + \left(F_{y_{cable_{prod}}}(t) * w_y(t)\right)^2} \quad (8)$$

Kako bi dobio ukupno proizvedenu snagu, od snage proizvedene u fazi proizvodnje treba oduzeti snagu utrošenu u fazi oporavka. Sile koje djeluju na balon u fazi oporavka prikazane su na slici 12.



Slika 12. Prikaz sila na balon u fazi oporavka

Snaga potrošena u fazi oporavka računa se prema jednadžbi (9)

$$P_{rec}(t) = F_{cable_{rec}}(t) * C_1(t) \quad (9)$$

Ukupna sila u užetu računa se prema jednadžbi (10)

$$F_{cable_{rec}}(t) = \sqrt{F_{x_{cable_{rec}}}(t)^2 + F_{y_{cable_{rec}}}(t)^2} \quad (10)$$

Sile u užetu u smjeru osi x i y zavise od položaja balona. Ako je balon iznad granice od 1500 m, vitlo navlači kabel slabije nego kada se on spusti ispod granice od 1500 m. U jednadžbama za silu u smjeru osi x to se prikazuje ovako:

$$F_{x_{cable_{rec}}}(t, > 1500m) = C(t) * x_{dir} + C_1(t) * K_{pull} * x_{dir} \quad (11)$$

$$F_{x_{cable_{rec}}}(t, < 1500m) = C(t) * x_{dir} + C_1(t) * K_{pull} * x_{dir} + K_{recover} * x_{dir} \quad (12)$$

Sila u užetu u smjeru osi y računa se analognim jednadžbama kao i u smjeru osi x.

Nakon što model izračuna snagu potrošenu u fazi oporavka, jednadžbom (13) izračuna i ukupnu snagu proizvedenu u jednoj jedinici postrojenja koja se može predati spremniku energije

$$P_{netto_1}(t) = P_{prod}(t) - P_{rec}(t) \quad (13)$$

Ukoliko je zadano da više jedinica radi istovremeno u paraleli, ukupna snaga računa se kao produkt snage proizvedene u jednoj pomnoženoj s brojem jedinica u paraleli

$$P_{netto_{tot}}(t) = P_{netto_1}(t) * n_{par} \quad (14)$$

U tablici 2. prikazane su regulacijske veličine u proporcionalnom regulatoru ovog modela koji upravlja pogonom vitla u zemaljskoj jedinici.

Tablica 2. Regulacijske konstante korištene u matematičkom modelu

Regulacijske konstante	Oznaka	Vrijednost
Konstanta pri spuštanju zračnog balona u području od najveće visine zračnog balona do granice od 1500 m	K_{pull}	5
Konstanta pri spuštanju zračnog balona u području od 1500 m visine do početne visine ciklusa	$K_{recover}$	20
Konstanta koja osigurava da brzina užeta koje se odmotava bude u zadanoj granici	$K_{produce}$	5

4. ANALIZA REZULTATA

Model simulira rad tri ciklusa te rezultate prikazuje u tri dijagrama:

- dijagram punjenja i pražnjenja baterije
- dijagram snage u ovisnosti o vremenu
- dijagram s trajektorijom koju opisuje balon svojim kretanjem.

Dijagram punjenja i pražnjenja baterije prikazuje ponašanje baterije kad ona u EE mrežu isporučuje kontinuiranu traženu snagu (50 kW, 500 kW ili 5 MW). Baterija za to vrijeme sprema električnu energiju proizvedenu u električnom generatoru. Ponašanje baterije izražava se preko stupnja napunjenosti baterije (SoC). Stupanj napunjenosti baterije mora biti unutar granica maksimalnog i minimalnog, a poželjno je da bude što konstantniji [16].

Dijagram snage u ovisnosti o vremenu prikazuje snagu proizvedenu u svim zračnim jedinicama u postrojenju koja bi se mogla implementirati u EE mrežu direktno bez korištenja spremnika energije (zelena krivulja na dijagramu). Prikazuje i snagu proizvedenu u samo jednoj zračnoj jedinici postrojenja (plava krivulja). Također prikazuje traženu snagu, odnosno snagu koju baterija isporučuje u EE mrežu (crvena krivulja).

Dijagram s trajektorijom prikazuje putanju kretanja zračnog balona u jednom ciklusu.

Iščitavanjem tih dijagrama može se zaključiti je li konkretna izvedba postrojenja izvediva ili ne.

5.3. Rezultati simulacije za nazivnu snagu od 50 kW

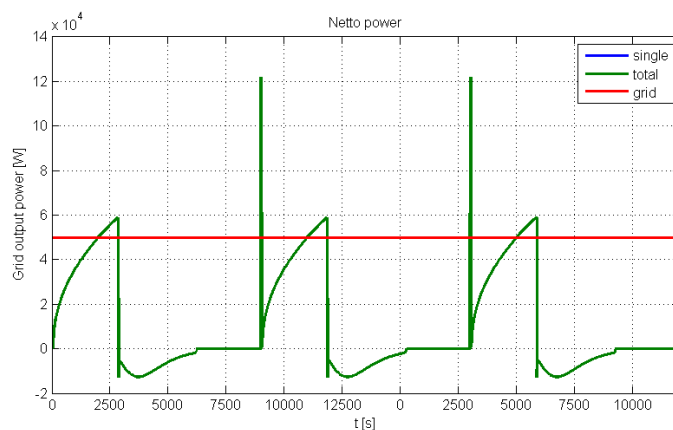
5.3.1. Jedna veća jedinica sa spremnikom energije

S obzirom da je snaga proizvedena u jednoj većoj jedinici izrazito diskontinuirana kao što se vidi na slici 7., nemoguće je električnu struju iz generatora implementirati direktno u EE mrežu te je stoga za izvođenje ovakvog sustava nužan spremnik energije koji će moći sačuvati energiju koju proizvodi električni generator te istodobno prosljeđivati energiju u EE mrežu. Takvo postrojenje koje se najbliže približava prihvatljivom dobije se ukoliko su ulazne varijable jednake onima iz tablice 3.

Tablica 3. Ulazne varijable za slučaj s jednom većom jedinicom i spremnikom energije

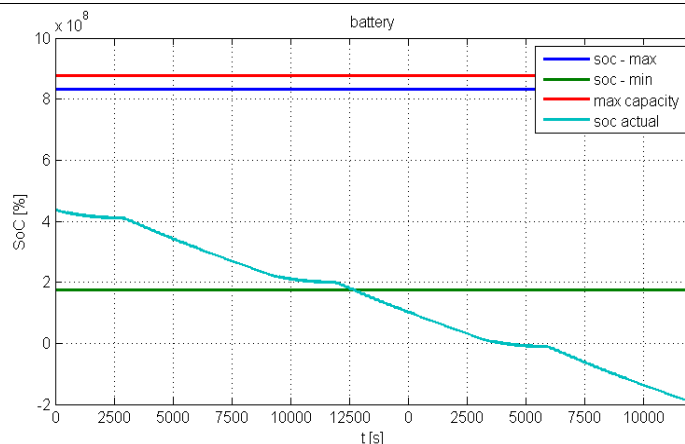
Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	5	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	9	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	8000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	50	kW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	1	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	1	-

Slika 13. pokazuje raspodjelu snage po vremenu za tri ciklusa.



Slika 13. Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s jednom većom jedinicom

Sa slike 13. jasno je vidljivo da je raspodjela snage i u ovom slučaju izrazito nepovoljna za implemetiranje u EE mrežu te je stoga potrebna baterija koja bi krivulju snage predane u EE mrežu izravnala (crvena krivulja na slici 13.). S obzirom da se mora koristiti baterija u ovakvom postrojenju, potrebno je kontrolirati ponašanje baterije koje se može vidjeti na slici 14.



Slika 14. Ponašanje baterije za slučaj postrojenja s jednom većom jedinicom

Na slici 14. jasno se vidi kako stupanj napunjenosti baterije nije ni približno konstantan kakav je poželjno da bude, nego čak i pada ispod granica minimalno dopuštenog u 1250. sekundi. Iz toga se može zaključiti kako je sustav od jedne veće zračne jedinice koji bi uz pomoć spremnika energije mogao u EE mrežu isporučivati snagu od 50 kW uz maksimalna odstupanja od 5%, prema ovom modelu, nemoguće realizirati. Potrebno je naglasiti da je to nemoguće ostvariti čak ni uz 10 puta veći električni kapacitet baterije nego što je zadan u modelu.

5.3.2. Više manjih jedinica bez spremnika energije koje rade uz određeni fazni pomak

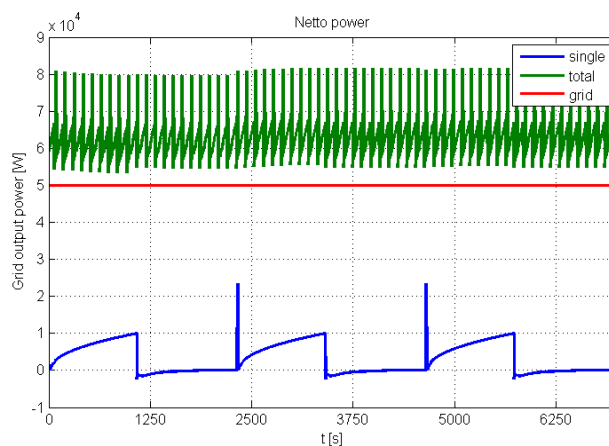
Jedna od mogućih shema postrojenja za koje se predviđalo da će dati pozitivne rezultate, odnosno da će biti primjenjiva za ovaj slučaj tražene snage od 50 kW uz maksimalna odstupanja od 5%, jest postrojenje koje bi se sastojalo od više manjih jedinica koje bi radile uz određeni pomak. Ideja je bila da se postrojenja puštaju uz takav fazni pomak kojim će uspjeti snagu direktno isporučenu u EE mrežu držati u zadanim granicama.

Nakon velikog broja mijenjanja varijabli, najbolji rezultat je postignut s ulaznim varijablama jednakim onima u tablici 4.

Tablica 4. Ulazne varijable za slučaj s više manjih jedinica pomaknutih u fazu

Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	3	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	8	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	6000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	50	kW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	21	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	1	-

Slika 15. pokazuje raspodjelu snage po vremenu tri ciklusa za ovaj slučaj.

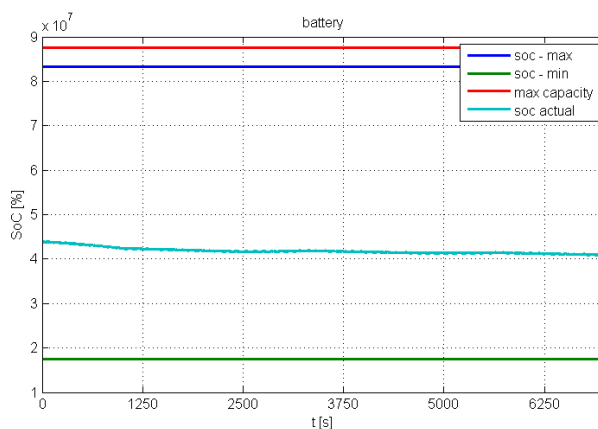


Slika 15. Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s više manjih jedinica

Iz slike 15. može se zaključiti da nije moguće dimenzionirati postrojenje koje bi se sastojalo od puno malih jedinica koje bi radile u seriji uz određeni fazni pomak bez korištenja spremnika energije. Snagu koju takvo postrojenje izručuje u EE mrežu, prema ovom modelu, nije bilo moguće približiti traženim 50 kW, a da odstupanja budu do 5%.

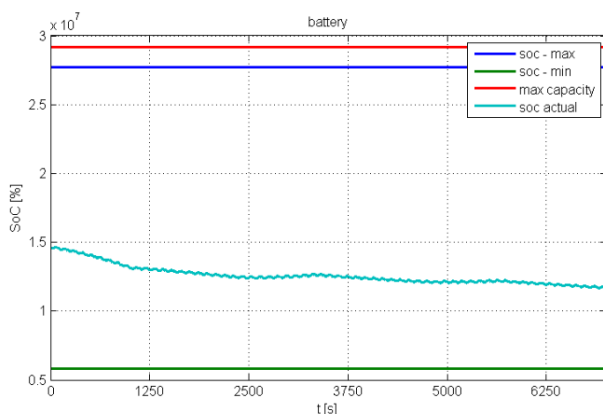
5.3.3. Više manjih jedinica sa spremnikom energije

Jedini način na koji se može dimenzionirati postrojenje, a da daje snagu u EE mrežu od 50kW uz odstupanja od 5%, jest postrojenje koje se sastoji od više manjih jedinica koje su sve spojene na isti spremnik baterije koja osigurava konstatnu isporuku snage u EE mrežu. Ulazni podaci za takav slučaj jednaki su onima iz tablice 4. za slučaj s više manjih jedinica koje rade pomaknuto u fazi. Dijagram raspodjele snage takvog postrojenja jednak je dijagramu na slici 15. Ostaje jedino za provjeriti ponašanje baterije, odnosno hoće li ona moći izdržati takvo opterećenje u dužem periodu. Ponašanje baterije vidljivo je na slici 16.



Slika 16. Ponašanje baterije za slučaj postrojenja s više jedinica

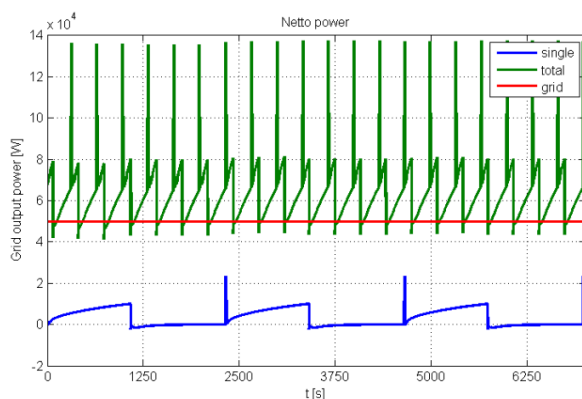
Na slici 16. jasno je kako stupanj napunjenosti baterije ostaje približno konstantan unutar zadanih granica. Očito je kako baterija takvo opterećenje lagano podnosi, i to uz početni kapacitet baterije u modelu. Kapacitet baterije u ovom slučaju ne treba biti velik kako bi pokrio područje u kojem se kreće stupanj napunjenosti baterije, a to se vidi i na slici 17. gdje je prikazano ponašanje baterije u postrojenju jednakom ovom na slici 16., s tim da je kapacitet te baterije jednak samo trećini kapaciteta zadanog u modelu.



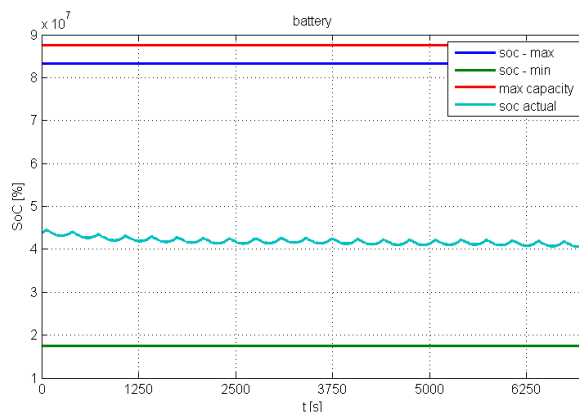
Slika 17. Ponašanje baterije čiji je kapacitet jednak trećini početnog kapaciteta

Na slici 17. vidljivo je kako baterija i sa ovako smanjenim kapacitetom uspijeva održati stupanj napunjenosti baterije unutar granica. To znači da je za realizaciju ovakvog postrojenja moguće u sustav ugraditi bateriju manjeg kapaciteta, što znači i manju investiciju za bateriju.

Osim sa 21 manjom jedinicom koje rade u seriji, moguće je postrojenje ovih dimenzija rasporediti na način da 7 jedinica rade u seriji, a 3 istodobno u paraleli. Zadovoljavajući rezultati dobiju se i na taj način što se vidi na slikama 18. i 19.

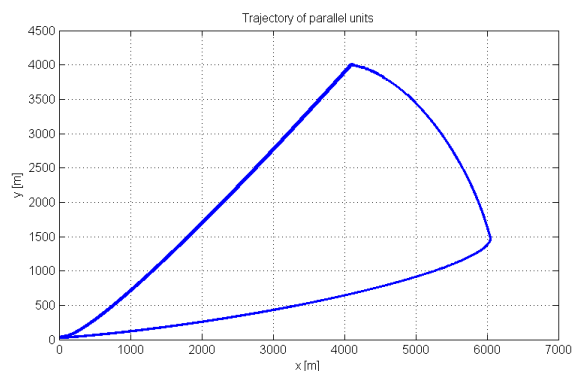


Slika 18. Raspodjela snage za postrojenje sa 7 serijskih i 3 paralelno spojene jedinice



Slika 19. Ponašanje baterije za postrojenje sa 7 serijski i 3 paralelno spojene jedinice

Trajektorija je jednaka za oba slučaja i prikazana je na slici 20.



Slika 20. Trajektorija zračnog balona

5.3. Rezultati simulacije za nazivnu snagu od 500 kW

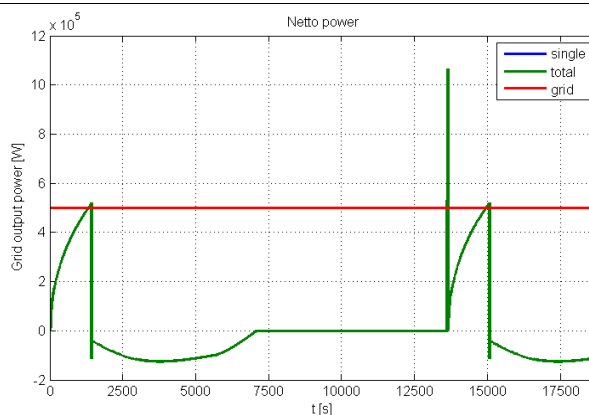
5.3.1. Jedna veća jedinica sa spremnikom energije

S obzirom da se koristeći postrojenje s jednom velikom jedinicom i spremnikom energije nije moglo zadovoljiti uvjete ni za snagu od 50 kW, bilo je za pretpostaviti da će isti slučaj biti i za snagu od 500 kW. Probalo se različitim kombinacijama vrijednosti promjera balona i vrijednosti omjera duljine i promjera balona postići povoljnije uvjete rada za bateriju, ali njen zadani kapacitet je jednostavno premalen da bi mogao pokriti zahtjev za tolikom snagom. Za prikaz rezultata uzete su ulazne varijable prikazane u tablici 5.

Tablica 5. Ulazne varijable za slučaj s jednom većom jedinicom i spremnikom energije

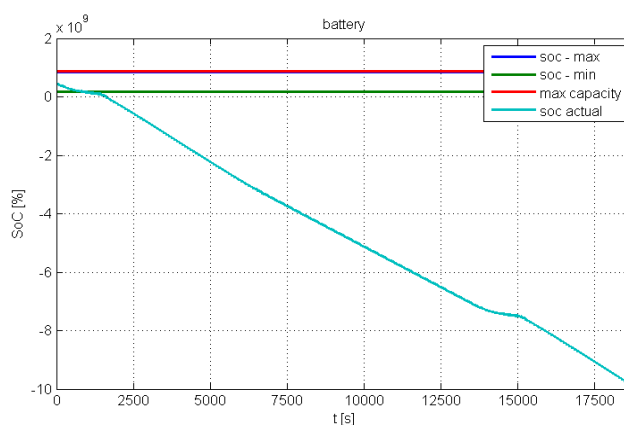
Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	10.5	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	30	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	8000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	500	kW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	1	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	1	-

Na slici 21. prikazana je raspodjela snage po vremenu za ovaj slučaj.



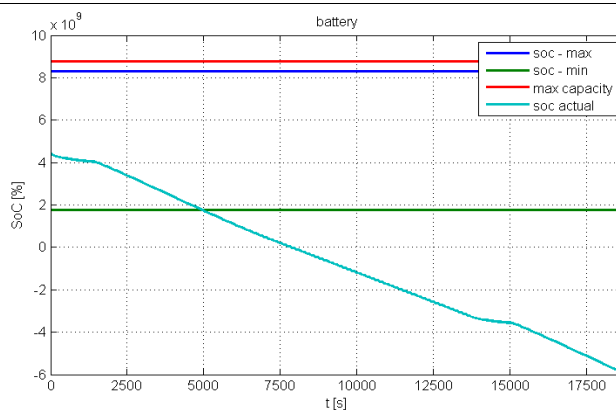
Slika 21. Raspodjela snage za postrojenje sa jednom velikom jedinicom i spremnikom energije

Zračni balon je, prema ovom modelu, potrebno dimenzionirati na način koji je u stvarnosti teško zamisliv (duljina balona je 315m) da bi barem vršcima snage postrojenje postiglo traženih 500 kW te je lako zaključiti da je takvo postrojenje neostvarivo. Baterija početnih svojstava u ovakvom slučaju nikako ne može zadovoljiti uvjete. Radi toga se probalo povećati kapacitet baterije kako bi se postigao bolji rezultat. Na slici 22. prikazano je ponašanje baterije koja ima 10 puta veći kapacitet od baterije početnih svojstava.



Slika 22. Ponašanje baterije 10 puta većeg kapaciteta u postrojenju s jednom velikom jedinicom

Na slici 22. vidljivo je da stupanj napunjenosti baterije već oko 1000. sekunde pada ispod minimalno dopuštenog. Koliko je ovakvo postrojenje teško ostvarivo pokazuje i slika 23. na kojoj je prikazano ponašanje baterije koja ima kapacitet 100 puta veći od onog početnog.



Slika 23. Ponašanje baterije 100 puta većeg kapaciteta u postrojenju s jednom velikom jedinicom

Na slici 23. jasno je da stupanj napunjenosti baterije pada ispod minimalno dopuštenog u 5000. sekundi što je još jedan pokazatelj toga da je ovakvo postrojenje nemoguće optimizirati da svojim radom implementira u EE mrežu snagu od 500 kW uz maksimalna odstupanja od 5%.

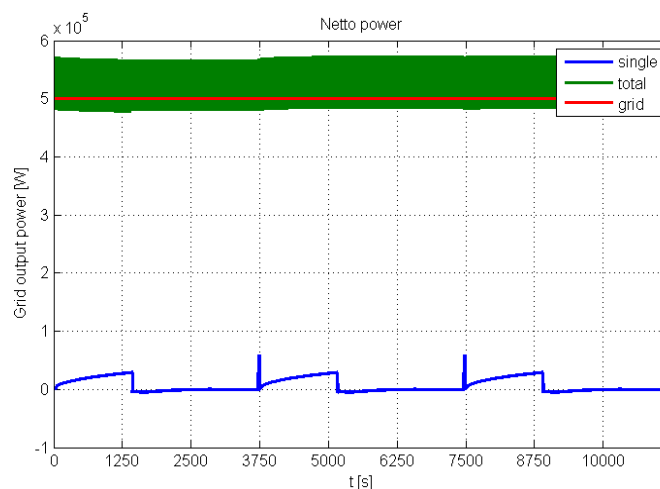
5.3.2. Više manjih jedinica bez spremnika energije koje rade uz određeni fazni pomak

Postrojenje koje bi se sastojalo od više manjih jedinica koje ne bi koristile spremnik energije nego bi proizvedenu električnu energiju implementiralo direktno u EE mrežu pokazalo se ostvarivim za slučaj nazivne snage od 500 kW. Takav rezultat se dobije ukoliko su ulazni podaci jednaki onima iz tablice 6.

Tablica 6. Ulazne varijable za slučaj s više manjih jedinica koje rade uz fazni pomak

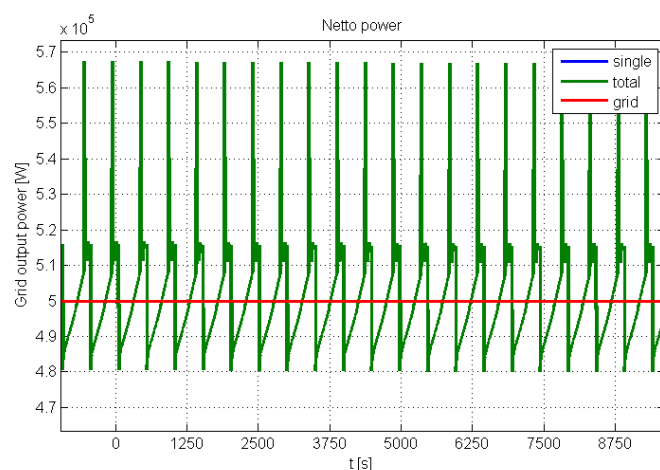
Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	3.5	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	15	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	8000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	500	kW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	76	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	1	-

Raspodjela snage po vremenu za ovakvo postrojenje vidljiva je na slici 24.



Slika 24. Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s više manjih jedinica

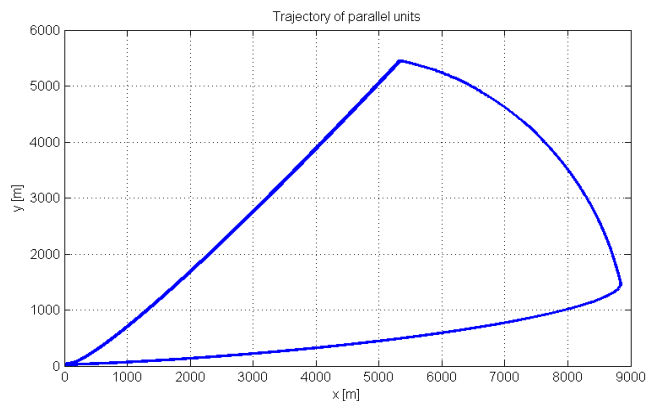
Na slici 24. vidljivo je kako se snaga kreće oko traženih 500 kW. Kako bi se fluktuacija snage mogla bolje vidjeti, na slici 25. prikazan je detalj sa slike 24.



Slika 25. Detalj s dijagrama raspodjele snage po vremenu sa slike 24.

Na slici 25. jasno se vidi da se snaga implementirana u EE mrežu kreće između vrijednosti od 4.8 do $5.2 \cdot 10^5$ W što upada točno u granice maksimalnih odstupanja od 5% (od 4.75 do $5.25 \cdot 10^5$ W). Problem u ovom slučaju rade vrši snaga koji se pojavljuju prema ovom modelu, ali s obzirom da su oni samo trenutni skokovi snage zaključeno je da ovo postrojenje zadovoljava tražene performanse sustava.

Na slici 26. prikazana je trajektorija zračnog balona ovakvog postrojenja.



Slika 26. Trajektorija zračnog balona

5.3.3. Više manjih jedinica sa spremnikom energije

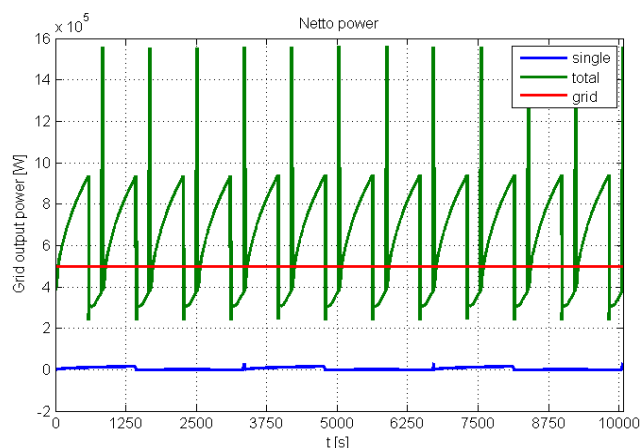
Ostvarivim se pokazalo i postrojenje koje bi se sastojalo od više manjih jedinica povezanih na isti spremnik energije. Ulazni podaci za takvo postrojenje nalaze se u tablici 7.

Tablica 7. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s više manjih jedinica i spremnikom energije

Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	3.5	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	8	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	8000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	500	kW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	4	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	37	-

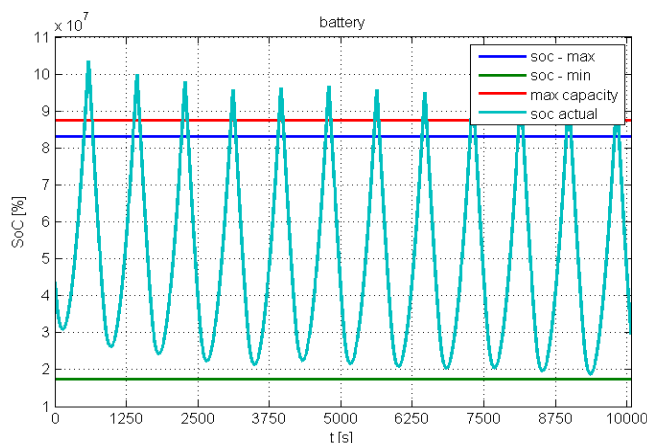
Takvo postrojenje sastojalo bi se od 37 paralelnih skupina jedinica koje bi radile istovremeno, a svaku od tih skupina činile bi 4 jedinice koje rade u seriji, odnosno uz određeni fazni pomak.

Raspodjela snage po vremenu za takvo postrojenje vidljiva je na slici 27.



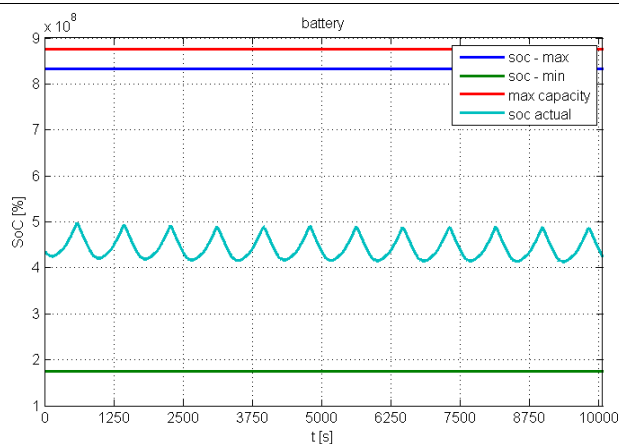
Slika 27. Raspodjela snage za postrojenje sa 4 serijske i 37 paralelno spojenih jedinica

Raspodjela snage očito nije prihvatljiva za direktnu implementaciju u EE mrežu te se zbog toga koristi baterija. Ponašanje baterije zadanih karakteristika vidljivo je na slici 28.



Slika 28. Ponašanje baterije zadanih karakteristika za postrojenje od 4 serijske i 37 paralelnih jedinica

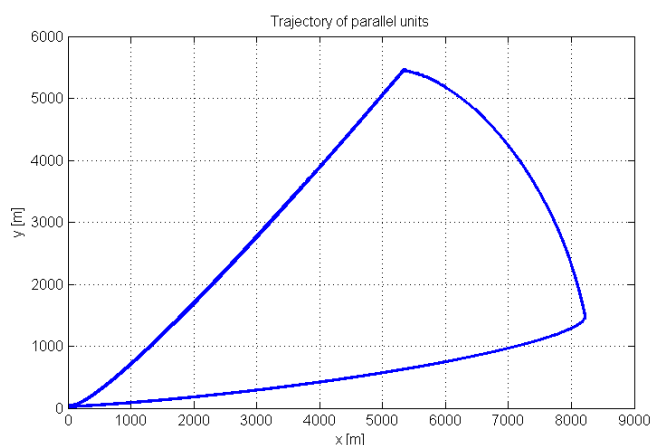
Na slici 28. očito je kako stupanj napunjenosti baterije prelazi maksimalno dopuštenu vrijednost u 600. sekundi te je zbog toga potrebno prilagoditi bateriju. To se postiže povećanjem njenog kapaciteta 10 puta. Ponašanje takve baterije u ovom postrojenju prikazano je na slici 29.



Slika 29. Ponašanje baterije 10 puta većeg kapaciteta u postrojenju sa 4 serijske i 37 paralelnih jedinice

Stupanj napunjenosti baterije u ovom slučaju ostaje unutar granica dopuštenog iz čega se može zaključiti da je, uz povećanje kapaciteta baterije, moguće realizirati postrojenje od više manjih jedinica povezanih na jednu bateriju.

Trajektorija zračnog balona ovakvog postrojenja prikazana je na slici 30.



Slika 30. Trajektorija zračnog balona

5.3. Rezultati simulacije za nazivnu snagu od 5 MW

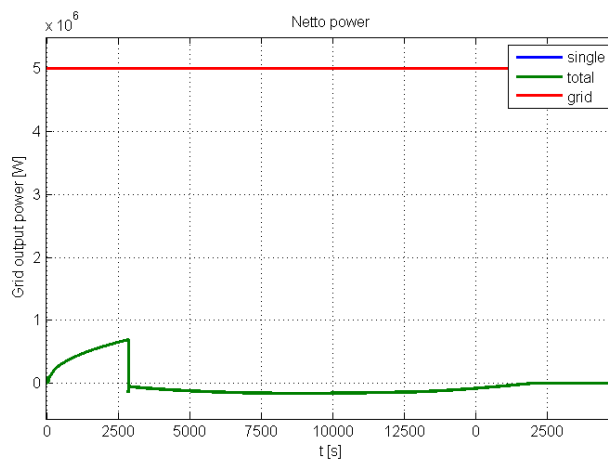
5.3.1. Jedna veća jedinica sa spremnikom energije

Postrojenje koje bi davalo izlaznu snagu od 5 MW, a koje bi se sastojalo samo od jednog balona nije moguće dimenzionirati. To je bilo i očekivano s obzirom da takav tip postrojenja nije davao zadovoljavajuće rezultate ni za snage od 50 i 500 kW. U tablici 8. prikazani su ulazni podaci za takvo postrojenje.

Tablica 8. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s jednom većom jedinicom i spremnikom energije

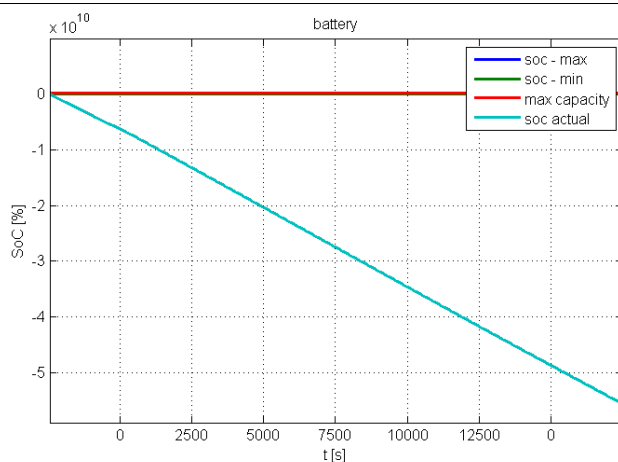
Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	10.5	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	40	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	8000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	5	MW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	1	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	1	-

Na slici 31. vidi se raspodjela snage po vremenu za ovakvo postrojenje.



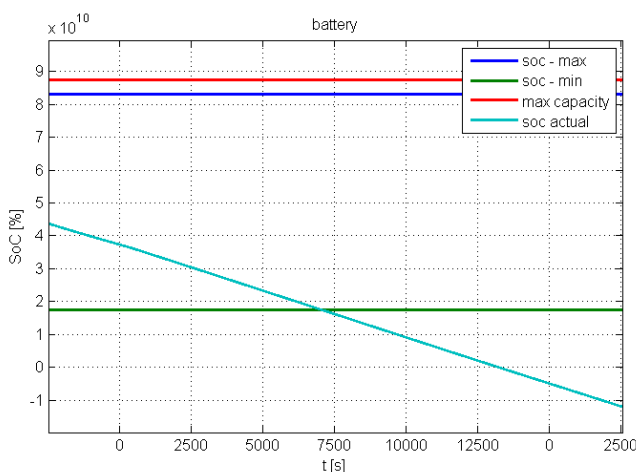
Slika 31. Raspodjela snage za postrojenje sa jednom velikom jedinicom i spremnikom energije

Na slici 31. jasno se vidi da takvo postrojenje jednostavno ne može proizvesti dovoljno snage bez obzira što su ovi ulazni podaci predimenzionirani (duljina takvog balona je 420 m). Spremnik energije nema ni približno dovoljan kapacitet da bi ovo postrojenje moglo implementirati dovoljnu snagu električne energije u elektroenergetsku mrežu. Dokaz tome vidi se na slici 32. na kojoj je prikazan stupanj napunjenosti baterije sa početnim kapacitetom.



Slika 32. Stupanj napunjenosti baterije zadanog kapaciteta

Na slici 33. prikazan je stupanj napunjenosti baterije čiji je kapacitet 1000 puta veći od početnog, a čak ni toliki kapacitet ne može održati stupanj napunjenosti unutar dopuštenih granica. To je još jedan pokazatelj toga kako je ovakvo postrojenje nemoguće dimenzionirati za zadanu snagu.



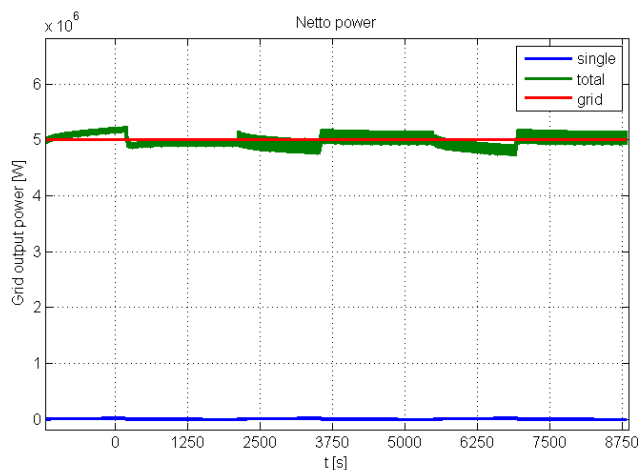
Slika 33. Stupanj napunjenosti baterije kapaciteta 1000 puta većeg od zadanog

5.3.2. *Više manjih jedinica bez spremnika energije koje rade uz određeni fazni pomak*
 Postrojenje koje bi se sastojalo od većeg broja manjih jedinica koje bi radile uz određeni fazni pomak te direktno implementirale snagu u EE mrežu pokazalo se mogućim i za snagu od 5 MW. Ulazni podaci postrojenja koje daje zadovoljavajuće rezultate prikazani su u tablici 9.

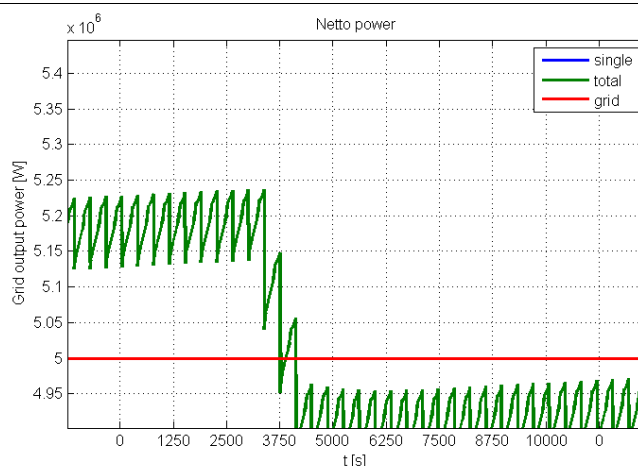
Tablica 9. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s više manjih jedinica koje rade uz određeni fazni pomak

Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	3.5	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	8.5	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	8000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	5	MW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	225	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	5	-

Raspodjela snage po vremenu ovakvog postrojenja vidljiva je na slici 34.

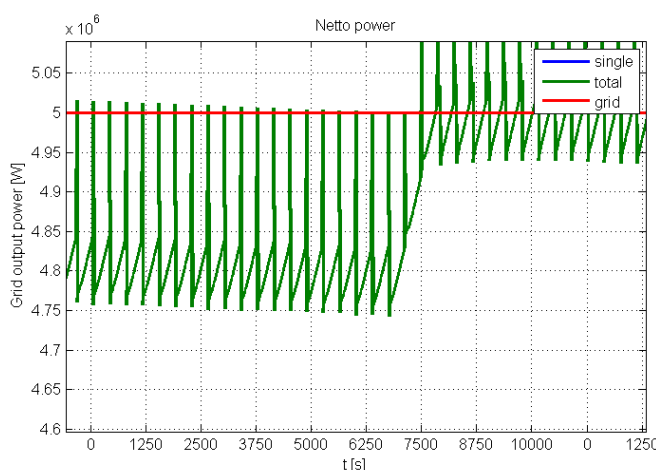
**Slika 34. Raspodjela snage po vremenu za tri ciklusa postrojenja s više manjih jedinica**

Na slici 34. vidi se da se snaga kreće oko traženih 5 MW, te se za bolji uvid u točne iznose snaga u određenim trenucima prilažu detalji sa slike 34.



Slika 35. Detalj s dijagrama raspodjele snage po vremenu sa slike 34. – maksimalna snaga

Slika 35. prikazuje snagu koja je najviša u radu ovog postrojenja te vidimo da se ona nalazi ispod granice od 5.25 MW koja označava pozitivan pomak od 5% u odnosu na nazivnu snagu od 5 MW.

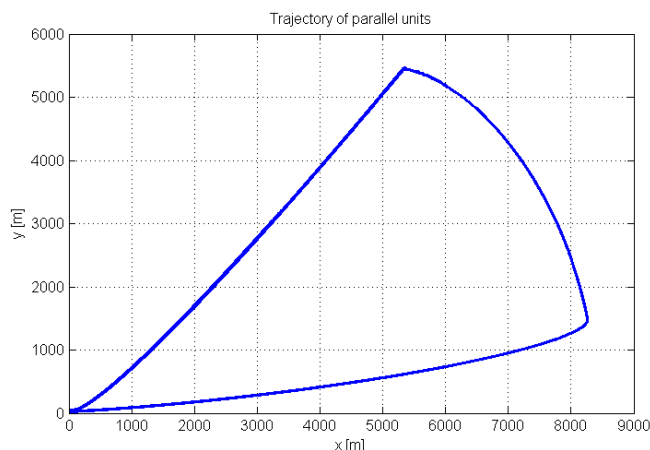


Slika 36. Detalj s dijagrama raspodjele snage po vremenu sa slike 34. – minimalna snaga

Slika 36. prikazuje najnižu snagu ostvarenu u ovakvom postrojenju te je vidljivo da je ona iznad granice od 4.75 MW koja označava negativan pomak od 5% u odnosu na nazivnu snagu od 5 MW.

Iz prikazanog zaključuje se kako je moguće dimenzionirati postrojenje koje bi se sastojalo od velikog broja manjih jedinica bez spremnika energije koje bi davalo snagu od 5 MW uz odstupanje od 5%.

Na slici 37. prikazana je trajektorija jednog ciklusa takvog postrojenja.



Slika 37. Trajektorija zračnog balona

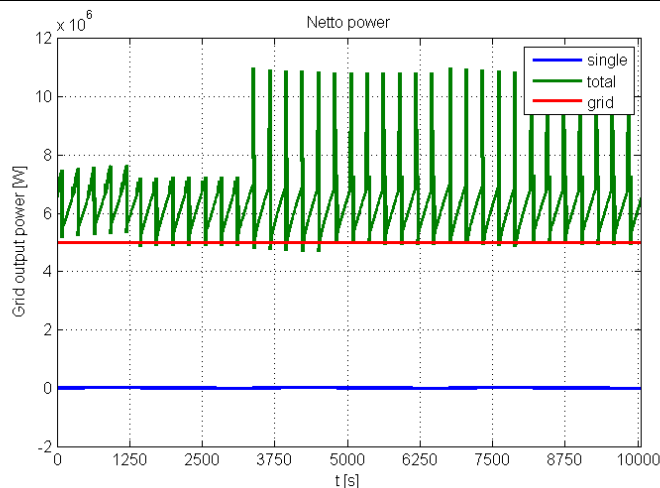
5.3.3. Više manjih jedinica sa spremnikom energije

Postrojenje koje bi se sastojalo od više manjih jedinica i spremnika energije moguće je, ali uz povećanje kapaciteta baterije. Ipak, treba naglasiti da prema ovom modelu ovakvo postrojenje ne daje zadovoljavajuće rezultate za dulje vremensko razdoblje, osim ako se kapacitet baterije dodatno poveća. Ulazni podaci za takav slučaj nalaze se u tablici 10.

Tablica 10. Ulazne varijable za slučaj postrojenja s više manjih jedinica i spremnikom energije

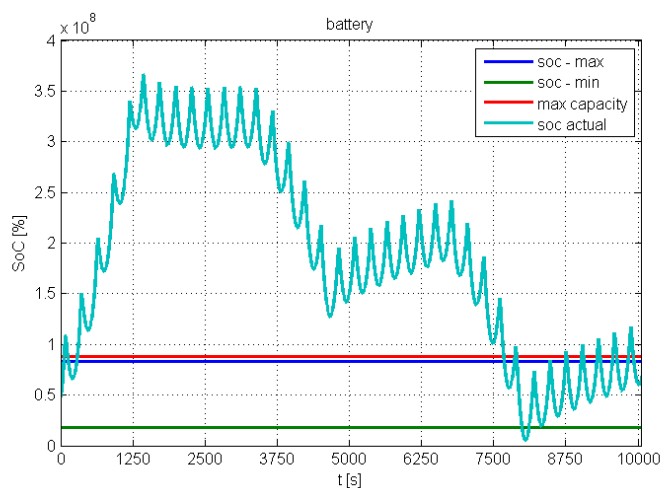
Ulazne varijable modela	Oznaka varijable	Vrijednost varijable	Mjerna jedinica varijable
promjer valjkastog balona zračne jedinice	D_{abm}	3.5	m
omjer duljine i promjera valjkastog balona zračne jedinice	L_{abm}/D_{abm}	8.5	-
duljina kabla namotanog na vitlo i privezanog na zračnu jedinicu	L_k	8000	m
nominalni zahtjev EE mreže	P_{grid}	5	MW
broj jedinica spojenih u seriju koje rade uz određeni fazni pomak	n_{ser}	12	-
broj jedinica spojenih u paraleli koje rade istodobno	n_{par}	117	-

Slika 38. prikazuje raspodjelu snage po vremenu za ovaj slučaj.



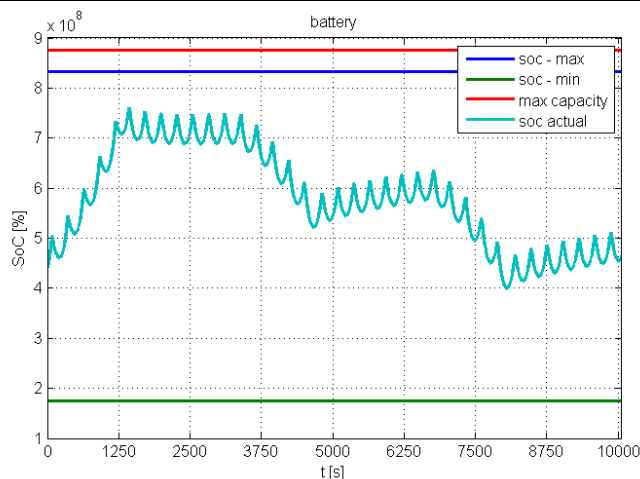
Slika 38. Raspodjela snage po vremenu za postrojenje s više manjih jedinica i spremnikom energije

Iz slike 38. očito je da je potreban spremnik energije koji će omogućiti ujednačenu implementaciju snage od 5 MW u EE mrežu. Stupanj napunjenosti takvog spremnika prikazan je na slici 39.



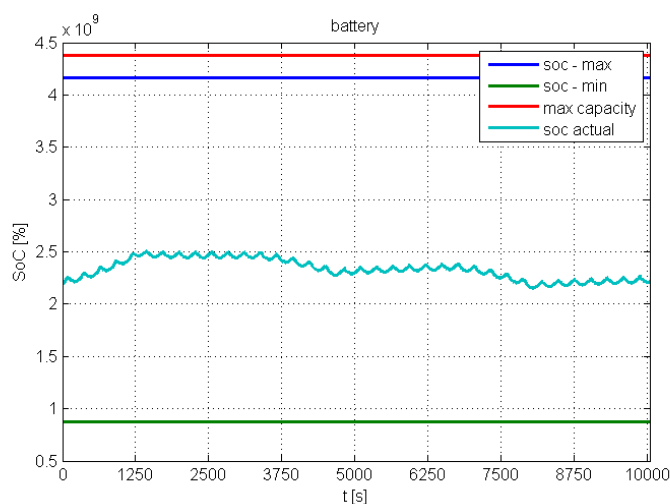
Slika 39. Ponašanje baterije početnih karakteristika za postrojenje od 12 serijskih i 117 paralelnih jedinica

Na slici 39. vidljivo je da je početni kapacitet baterije premalen da bi mogao zadržati stupanj napunjenosti baterije unutar granica. Prihvatljivo rješenje dobije se korištenjem baterije čiji je kapacitet 10 puta veći od početnog. Ponašanje baterije čiji je kapacitet 10 puta veći od početnog prikazano je na slici 40.



Slika 40. Ponašanje baterije 10 puta većeg kapaciteta u postrojenju sa 12 serijskih i 117 paralelnih jedinica

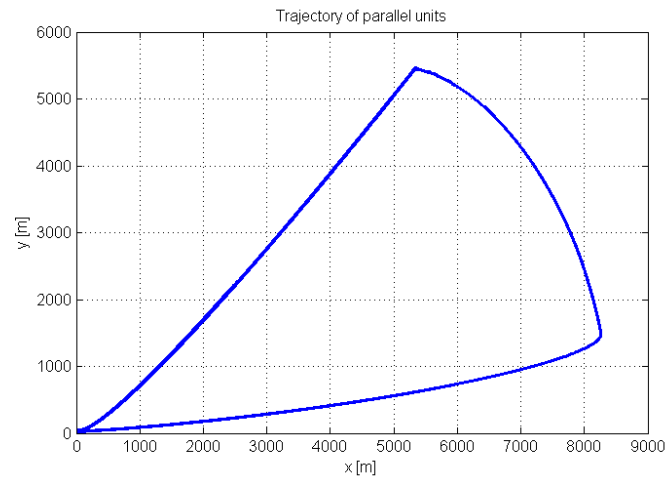
Na slici 40. vidimo kako se stupanj napunjenosti baterije nalazi unutar zadanih granica. Ipak, očit je i trend spuštanja stupnja napunjenosti te se može zaključiti da će se stupanj napunjenosti relativno brzo spustiti ispod minimalne dopuštene vrijednosti, pogotovo ako se uzme u obzir da slika 40. prikazuje ponašanje baterije za samo 3 ciklusa postrojenja. Iz toga slijedi da ovakvo postrojenje nije moguće realizirati za rad na dulje vrijeme. Vrijeme rada ovakvog postrojenja može se produžiti tako da se kapacitet poveća za još 5 puta, odnosno da kapacitet baterije bude 50 puta veći od zadanog. Ponašanje baterije takvog kapaciteta prikazano je na slici 41.



Slika 41. Ponašanje baterije 50 puta većeg kapaciteta u postrojenju sa 12 serijskih i 117 paralelnih jedinica

Na slici 41. vidi se kako stupanj napunjenosti baterije u ovom slučaju ima puno sporiji trend padanja što znači da će ovakvo postrojenje moći dulje vremena proizvoditi traženu snagu.

Trajektorija zračnog balona ovakvog postrojenja prikazana je na slici 42.



Slika 42. Trajektorija zračnog balona

5. EKONOMSKI PARAMETRI

S obzirom da zadatak završnog rada zahtijeva računanje ekonomskih parametara pomoću kojih bi se mogla procijeniti ekonomska isplativost postrojenja, dani su primjeri izračuna za vrste postrojenja koje su zadovoljile uvjete predaje električne energije u elektroenergetsku mrežu. Ulazni podaci za računanje ekonomskih parametara koji u sebi sadržavaju procjenu cijena komponenata sustava za proizvodnju i pohranu energije dani su u tablici 11.

Tablica 11. Ulazni podaci za računanje ekonomskih parametara

<i>Komponenta sustava</i>	<i>Procijenjena cijena</i>
HAWE jedinica	172.8 eur/kW instalirane snage [17]
Spremnik energije	5000 eur/kWh dostupne pohrane [18]
<i>Ostali podaci</i>	<i>Procijenjena cijena</i>
Očekivana dobit	1kn/kWh proizvedene energije [19]
Diskontna stopa	8.8 %
Broj godina	20
Troškovi održavanja i popravaka (OPEX)	8 eur/MWh proizvedene energije
Faktor angažirane snage	38.5 %

Investicijski troškovi (CAPEX) računat će se prema jednadžbi (15) [19].

$$CAPEX = (172.8 * HAWE snaga [kW] + 5000 * potrebna dostupna pohrana [kWh]) * 1.5 \quad (15)$$

Ekonomski parametri kojima će se procijeniti ekonomska isplativost postrojenja su unutarnja stopa porasta (IRR) i nivelirani trošak proizvodnje (LCOE).

5.3. Unutarnja stopa porasta - IRR

Unutarnja stopa porasta (IRR) je ona stopa porasta koja izjednačava sadašnju vrijednost očekivanih troškova sa sadašnjom vrijednosti očekivanih prihoda [20]. Jednostavno rečeno, to je stopa rasta po kojoj ulagač u neki projekt tim projektom zaradi točno onoliko da mu se povрати cijela investicija. Računanje unutarnje stope porasta vrši se pomoću jednadžbe (16) [21].

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0 \quad (16)$$

5.3. Nivelirani trošak proizvodnje – LCOE

Nivelirani trošak proizvodnje (LCOE) je mjera za trošak proizvodnje električne energije proizvedene električnim generatorom [22]. Računa se na način da se svi predviđeni životni troškovi postrojenja (gradnja, financijski troškovi, gorivo, odražavanje, porezi, osiguranje i poticaji) podijele s očekivanom izlaznom energijom (kWh) proizvedenom u postrojenju za vrijeme cijelog njegovog radnog vijeka. Način računanja prikazan je jednadžbom (17) [23].

$$LCOE = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{I_n + M_n + F_n}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+r)^n}} \quad (17)$$

5.3. Ekonomski parametri za ostvariva postrojenja

U nastavku završnog rada dani su rezultati izračuna unutarnje stope porasta i niveliranog troška proizvodnje za svako od postrojenja koja su uspjela zadovoljiti uvjet stabilne predaje električne energije u elektroenergetsku mrežu.

5.3.1. Ekonomski parametri za postrojenje izlazne snage od 50 kW – više manjih jedinica sa spremnikom energije

U slučaju postrojenja s izlaznom snagom od 50 kW izračunata godišnja količina energije iznosi 168 630 kWh/god. Početna investicija je 1 489 405 kuna, godišnji troškovi održavanja su 10 279 kn/god, a godišnja dobit je 168 360 kn/god. Kroz razdoblje od 20 godina, unutarnja stopa porasta (IRR) iznosi 8.584 %, što je manje od diskontne stope od 8.8 % iz čega slijedi da investicija nije ekonomski isplativa. Nivelirani trošak proizvodnje iznosi 0.94 kn/kWh proizvedene energije.

5.3.2. Ekonomski parametri za postrojenje izlazne snage od 500 kW – više manjih jedinica sa spremnikom energije

U slučaju postrojenja izlazne snage 500 kW koje ima spremnik energije godišnje proizvedena količina energije je 1 686 300 kWh/god. Početna investicija je 14 864 029 kn, godišnji troškovi održavanja 102 793.8 kn/god, a godišnja dobit je 1 686 300 kn/god. Unutarnja stopa porasta te nivelirani trošak proizvodnje jednaki su kao i u gornjem slučaju, 8.584 %, odnosno 0.94 kn/kWh, što je logično s obzirom da u ovom slučaju proizvodimo 10 puta više energije, ali koristimo bateriju koja ima 10 puta veći kapacitet te se zbog toga poklapaju brojke IRR-a i LCOE-a.

5.3.3. *Ekonomski parametri za postrojenje izlazne snage od 500 kW – više manjih jedinica uz fazni pomak*

Za postrojenje izlazne snage 500 kW koje nema spremnik energije, nego jedinice rade uz određeni fazni pomak godišnja količina energije iznosi 1 686 300 kWh/god što je naravno jednako postrojenju iste snage koje koristi spremnik energije. Iz razloga što mu nije potreban spremnik energije, već se investicija sastoji samo od troškova izgradnje zračnih jedinica, izračunata početna investicija iznosi 987 552 kn, dok su godišnji troškovi održavanja i ostvarena dobit jednaki prethodnom postrojenju te iznose 102 793.8, odnosno 1 686 300 kn/god. Unutarnja stopa porasta (IRR) je u tom slučaju 160 %, a nivelirani trošak proizvodnje je 0.12 kn/kWh.

5.3.4. *Ekonomski parametri za postrojenje izlazne snage od 5 MW – više manjih jedinica sa spremnikom energije*

Za postrojenje izlazne snage 5 MW koje koristi spremnik energije ukupno proizvedena energija iznosi 16 863 000 kWh/god, početna investicija 79 408 020 kn, a troškovi održavanja 1 027 968 kn/god. Početna investicija je ovako visoka iz razloga što ovakvo postrojenje iziskuje spremnik energije čiji je kapacitet 50 puta veći od onog početnog u zadatku, a cijena spremnika energije ovisi o njegovom kapacitetu. Godišnja dobit iznosi 16 863 000 kn/god te je za takve podatke IRR jednak 19.36%, a LCOE 0.528 kn/kWh. Iz ovog se može zaključiti da je ovakvo postrojenje ekonomski isplativo.

5.3.5. *Ekonomski parametri za postrojenje izlazne snage od 5 MW – više manjih jedinica uz fazni pomak*

Postrojenje izlazne snage 5 MW koje nema spremnik energije se pokazuje također vrlo isplativim, što je bilo za zaključiti s obzirom da početna investicija u sebi ne sadrži trošak za spremnik energije. Proizvedena godišnja energija je, jednako kao i u gornjem slučaju, 16 863 000 kWh/god, ali je zato početna investicija puno manja, odnosno 9 875 520 kn. Godišnji troškovi održavanja su 1 027 968 kn/god, a očekivana dobit 16 863 000 kn/god. Ovakvi podaci daju jako visoku unutarnju stopu porasta od 160 %, te nisku nivelirani trošak proizvodnje od 0.12 kn/kWh.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je postupak dimenzioniranja sustava za proizvodnju električne energije iz visinskih vjetrova baziranog na Magnusovom efektu. Dimenzioniranje se vršilo pomoću modela razvijenog unutar FSB-a za potrebe projekta HAWE na način da su se mijenjale dimenzije zračnog balona te broj jedinica spojenih u seriju i paralelu. Povećanjem broja jedinica spojenih u seriju nastojalo se postići što konstantniju izlaznu snagu, dok se povećanjem broja jedinica u paraleli povećavao iznos izlazne snage.

Za nazivnu snagu od 50 kW, koja bi se predavala elektroenergetskoj mreži, jedini način koji se pokazao ostvarivim jest postrojenje koje bi se sastojalo od više manjih jedinica povezanih na istu bateriju. Takvo postrojenje sastojalo bi se od 21 serijski smještenih manjih jedinica promjera zračnog balona od 3 m te duljine balona od 24 m. Kapacitet baterije u tom slučaju ne mora biti velik, te se pozitivni rezultati postižu i s kapacitetom koji je jednak trećini početnog kapaciteta u matematičkom modelu. Postrojenje je moguće realizirati i na način da jedinice ovih dimenzija budu raspoređene po 7 u seriji te 3 u paraleli. Postrojenje ne bi bilo isplativo jer je unutarnja stopa porasta jednaka 8.584 % što je manje od diskontne stope. Nivelirani trošak proizvodnje u ovom bi slučaju iznosio 0.94 kn/kWh.

Za nazivnu snagu od 500 kW moguće su dvije vrste postrojenja. Jedna je, kao i u gornjem slučaju, postrojenje od više manjih jedinica sa baterijom kojoj je kapacitet povećan 10 puta od onog početnog. U tom slučaju, promjer balona bio bi 3.5 m, duljina 28 m, a postrojenje bi činile 4 serijski te 37 paralelno spojenih jedinica. Unutarnja stopa porasta bila bi 8.584 % te postrojenje ne bi bilo isplativo, a nivelirani trošak proizvodnje bio bi 0.94 kn/kWh. Drugi način bilo bi postrojenje koje se sastoji od više manjih jedinica koje direktno u EE mrežu implementiraju električnu energiju. One ne bi koristile spremnik energije, nego bi radile uz određeni fazni pomak te bi na taj način uspjele u mrežu puštati snagu koja bi bila u zadanim granicama zadatka. Takvo postrojenje sastojalo bi se od 76 serijski spojenih jedinica kod kojih bi promjer balona bio 3.5 m, a duljina balona 52.5 m. Postrojenje bi uz unutarnju stopu porasta od 160 % bilo jako isplativo, a nivelirani trošak proizvodnje iznosio bi niskih 0.12 kn/kWh.

Za nazivnu snagu od 5 MW također su moguće dvije vrste postrojenja. Jedna je postrojenje od više manjih jedinica koje rade uz određeni fazni pomak. Takvo postrojenje sadržavalo bi 225 serijski te 5 paralelno spojenih jedinica kod kojih bi promjer balona bio 3.5 m, a duljina balona 29.75 m. Postrojenje bi bilo isplativo jer je unutarnja stopa porasta jednaka 19.36 %, a nivelirani trošak proizvodnje bio bi 0.53 kn/kWh. Druga vrsta postrojenja koje bi bilo moguće realizirati

jest postrojenje od više manjih jedinica i spremnika energije čiji je kapacitet povećan 50 puta od početnog kapaciteta baterije. Takvo postrojenje sastojalo bi se od 12 serijski te 117 paralelno spojenih jedinica čiji bi promjer balona iznosio 3.5 m, a duljina balona 29.75 m. To postrojenje bi također bilo jako isplativo jer ima unutarnju stopu porasta od 160 % te niski nivelirani trošak proizvodnje od 0.12 kn/kWh.

U tablici 12. dana je kratka usporedba svih ovih postrojenja.

Tablica 12. Usporedba svih mogućih postrojenja

snaga	D_{abm}	L_{abm}/D_{abm}	n_{ser}	n_{par}	kapacitet spremnika	IRR	LCOE	isplativo postrojenje?
50 kW	3 m	8	21	1	početan	8.584 %	0.94 kn/kWh	NE
500 kW	3.5 m	8	4	37	10 x veći	8.584 %	0.94 kn/kWh	NE
500 kW	3.5	15	76	1	bez spremnika	160 %	0.12 kn/kWh	DA
5 MW	3.5	8.5	12	117	50 x veći	19.36 %	0.53 kn/kWh	DA
5 MW	3.5	8.5	225	5	bez spremnika	160 %	0.12 kn/kWh	DA

LITERATURA

- [1] »Enerpedia,« [Mrežno]. Available: http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETIKA_I_OKOLI%C5%A0.
- [2] »Eurostat,« [Mrežno]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_trends.
- [3] P. J. M. K. W.-R. Y. Apergis N., »On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth,« 2010..
- [4] »Eurostat - Statistics explained,« [Mrežno]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe_2020_indicators_-_climate_change_and_energy.
- [5] O. TR, Boundary Layer Climates, 1987..
- [6] »Windpower,« [Mrežno]. Available: http://www.windpower.org/en/knowledge/windpower_wiki.html.
- [7] »Izvori energije,« [Mrežno]. Available: http://www.izvorienergije.com/energija_vjetra.html.
- [8] »Wind Energy The Facts,« [Mrežno]. Available: <http://www.wind-energy-the-facts.org/index-2.html>.
- [9] C. K. Archer CL, »Global Assessment of High-Altitude Wind Power,« 2009..
- [10] P. A., »High Altitude Wind Resource Modeling and Analysis,« u *Airborne Wind Energy Conference*, 2010..
- [11] P. L., »Energija visokih vjetrova – energetski potencijal i koncepti za pretvorbu u korisnu električnu energiju,« u *Budućnost ugodnog stanovanja*, 2015..
- [12] »Britannica,« [Mrežno]. Available: <http://www.britannica.com/science/Magnus-effect>.
- [13] »Omnia - schematic,« [Mrežno]. Available: http://www.omnia.net/hawe/schematic_hawe.html.
- [14] »Omnia - concept,« [Mrežno]. Available: <http://www.omnia.net/hawe/concept.html>.
- [15] S. P. B. M. K. N. D. N. Perković L., »Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus' effect,« 2012..
- [16] »The Electropedia,« [Mrežno]. Available: <http://www.mpoweruk.com/soc.htm>.
- [17] A. S. B. M. M. H. C. Mone, »2013 Cost of Wind Energy Review,« National Renewable Energy Laboratory, 2013..
- [18] H. M. D. J. P. J. Pavković D., »Energy Storage Systems Sizing Study for Airborne Wind Energy Applications,« u *8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (8th SDEWES)*, Dubrovnik, 2013..
- [19] »Uputa od voditelja rada dr. sc. Luke Perkovića«.
- [20] »Investopedia,« [Mrežno]. Available: <http://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp>.
- [21] »Investopedia,« [Mrežno]. Available: <http://www.investopedia.com/ask/answers/022615/what-formula-calculating-internal-rate-return-irr-excel.asp>. [Pokušaj pristupa 2016.].
- [22] »Mercom Capital Group,« [Mrežno]. Available: <http://mercomcapital.com/what-is-inside-your-lcoe-assumptions>.

[23] »Renewable Energy Advisors,« [Mrežno]. Available: <http://www.renewable-energy-advisors.com/learn-more-2/levelized-cost-of-electricity/>.

PRILOZI

I. CD-R disc