

LINEARNI SISTEM ZA PRETVARANJE ENERGIJE MORSKIH TALASA U ELEKTRIČNU ENERGIJU

LINEAR SYSTEM FOR CONVERTING THE ENERGY OF SEA WAVES INTO ELECTRICAL ENERGY

Milena Aleksić, Boris Dumnić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu su predstavljene osnovni tipovi uređaja za konverziju energije morskih talasa u električnu. Poseban akcenat je stavljen na engl. point absorber-e zasnovane na bovnom elementu sa linearnim generatorom, kao osnovnom delu električnog podsklopa. U radu je predstavljen matematički model linearnog sinhronog generatora sa stalnim magnetima, za potrebe simulacionog modela kreiranog u MATLAB softverskom okruženju. Nadalje je izvršena analiza odziva simulacionog modela.

Ključne reči: *Obnovljivi izvori energije, energija talasa, linearni generator*

Abstract – In this paper, the basic types of wave energy conversion systems are presented. Special emphasis is placed on point absorber systems based on buoy element with linear generator as main component of the electrical subsystem. Furthermore, in paper is presented the mathematical model of linear synchronous permanent magnet generator, for the purpose of simulation model created in MATLAB software environment. Also, the analysis of the simulation responses is given.

Keywords: *Renewable energy sources, wave energy, linear generator*

1. UVOD

Biljke i drugi organizmi zakopani ispod slojeva sedimenata i stena prošli su milenijume da bi postali naslage bogate ugljenikom, koje danas nazivamo fosilna goriva. Ova neobnovljiva goriva, koja uključuju ugalj, naftu i prirodni gas, snabdevaju oko 80% svetske energije (završno sa 2019. godinom 84%) [1].

Njihova dominantna upotreba datira još od industrijske revolucije, što za posledicu ima veliki uticaj na klimatske promene, ali i na zdravlje ljudi. Tri četvrtine globalnih emisija gasova sa efektom staklene bašte rezultat su sagorevanja fosilnih goriva. Velika zagađenost rezultira sa najmanje 5 miliona prevremenih smrti svake godine.

Kako prirodi treba više vremena da stvori nove rezerve fosilnih goriva, dolazi i do sve većeg smanjenja postojećih zaliha zbog preterane eksploatacije, što nadalje

dovodi do povećanja potražnje za alternativnim, obnovljivim izvorima energije (OIE). U poslednje dve decenije veliki napredak postignut je u oblasti obnovljive i održive energije. Međutim, potrebno je uložiti više napora kako bi se povećao udeo obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji energije.

Solarna energija i energija vetra trenutno imaju najveći udeo u globalnoj proizvodnji energije, međutim postoje i drugi obnovljivi izvori koji sadrže ogroman potencijal. Tako, na primer, okean sadrži značajan energetska potencijal, čak 15-20 puta više po kvadratnom metru od Sunca i vetra [2].

Neke procene ukupnog energetska kapaciteta okeanskih talasa govore da se kreće od 8,000 TWh/godišnje do 80,000 TWh/godišnje, odnosno od 1 TW do 10 TW snage u celom okeanu [2]. Slika 1 pokazuje da je teoretski potencijal resursa energije okeana veći od trenutne globalne potražnje za električnom energijom, što ovu oblast čini veoma atraktivnom za mnoge istraživače, ali i lokalne i regionalne vlasti. S obzirom na činjenicu da više od polovine svetske populacije živi u krugu od 200 km od mora, snaga talasa ima potencijal da postane jedan od glavnih izvora energije. Pored ogromnog potencijala, energija morskih talasa je mnogo predvidljivija u poređenju sa drugim obnovljivim izvorima energije. Nažalost, doprinos energije okeana u globalnoj raspodeli energije je veoma mali, i ne očekuje se velika promena narednih godina, s obzirom da je većina tehnologija još u fazi razvoja i demonstracije.



Slika 1. *Svetska potrošnja električne energije u poređenju sa potencijalom energije talasa.*

Poslednjih decenija inženjeri širom sveta intenzivno rade na razvijanju velikog broja različitih WECS tehnologija

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Boris Dumnić, van. prof.

(engl. *Wave energy converters*), a koji se razvijaju spram tipa lokacije i baziraju se na drugačijim metodologijama rada. Uprkos činjenici da je mnogo različitih vrsta WECS-a patentirano, samo nekoliko njih je razvijeno i instalirano. Takođe, mnogi inženjeri ulažu velike napore kako bi smanjili troškove i povećali performanse sistema u cilju komercijalizacije ovih sistema. Ovo bi nadalje dovelo do veće energetske nezavisnosti, poboljšanog procesa dekarbonizacije, otvaranje novih radnih mesta, kao i mogućnosti stvaranje hibridnih sistema, odnosno kombinacija WECS sa drugim sistemima baziranim na obnovljivim izvorima energije.

2. UREĐAJI ZA PRETVARANJE ENERGIJE MORSKIH TALASA U ELEKTRIČNU ENERGIJU

S obzirom na to da su još u fazi razvoja, podela WECS-a može se izvršiti spram više pokazatelja. Neki od glavnih tipova WECS-a su:

- prigušivači – plutajući uređaji koji rade paralelno sa smerom talasa i hvataju energiju iz relativnog kretanja dva kraka dok talas prolazi pored njih,
- tačkasti apsorberi (engl. *point absorbers*) – plutajuće strukture koje apsorbuju energiju iz svih pravaca svojim kretanjima na/blizu vodene površine,
- oscilirajući vodeni stubovi – delimično potopljene, šuplje strukture, koji koriste zarobljen vazduh za strujanje u i iz atmosfere preko turbine,
- engl. *overtopping/terminator* uređaji – uređaji koji hvataju vodu dok talasi prodiru u rezervoar za skladištenje,
- potopljeni uređaji za razlikovanje pritiska - obično se nalaze blizu obale i pričvršćeni su za morsko dno; kretanje talasa dovodi do podizanja i pada nivoa mora iznad uređaja, izazivajući razliku pritiska u uređaju; naizmenični pritisak pumpa tečnost kroz sistem za proizvodnju električne energije,
- tehnologija izbočenih talasa - sastoji se od gumene cevi ispunjene vodom, usidrene na morsko dno u pravcu talasa, koji rade na principu promene pritiska duž cevi,
- rotirajuća masa - dva oblika rotacije se koriste za hvatanje energije kretanjem uređaja koji se uzdiže i njiše u talasima; ovo kretanje pokreće ili ekscentričnu težinu ili žiroskop uzrokuje precesiju; u oba slučaja kretanje je vezano za električni generator unutar uređaja i
- drugi uređaji – ovim su obuhvaćeni oni uređaji sa jedinstvenim i veoma različitim dizajnom u odnosu na poznatije tehnologije, kao i oni kod kojih se ne mogu utvrditi informacije o karakteristikama uređaja; na primer, talasni rotor je oblik turbine koju direktno okreću talasi; predložene su i fleksibilne strukture, pri čemu je struktura koja menja oblik/zapreminu deo sistema za preuzimanje snage [4].

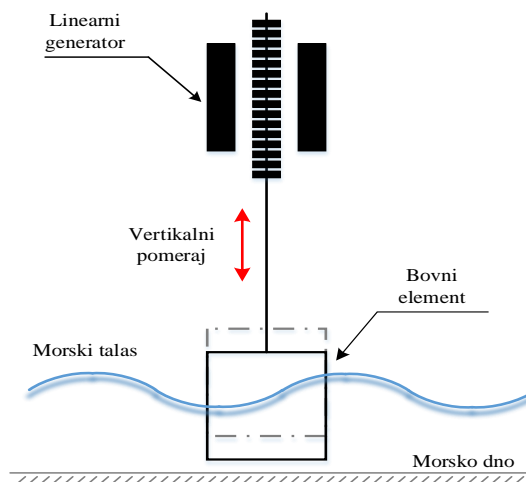
3. UREĐAJ ZA KONVERZIJU ENERGIJE MORSKIH TALASA SA LINEARNIM GENERATOROM

U radu je obrađen linearni uređaj za pretvaranje energije morskih talasa u električnu energiju. Ovaj uređaj predstavlja jedan od takozvanih *point absorber* uređaja. U literaturi, ovakvi sistemi uobičajeno su zasnovani na mehaničkom engl. *Power take-off* - PTO sistemu, i

rotacionoj ili linearnoj električnoj mašini. Predloženi uređaj koristi linearni sinhroni generator sa stalnim magnetima (eng. *Permanent Magnet Linear Generator – PMLG*), kao električni podsklop sistema [5].

Linearni uređaj za pretvaranje energije morskih talasa u električnu energiju sastoji se od električnog i mehaničkog podsistema, kao što je prikazano na slici 2. Električni podsystem, kao što je već spomenuto, predstavlja PMLG koji će u nastavku biti detaljnije opisan. Translatorni deo linearnog generatora povezan je sa bovnim elementom. Pri nailasku morskog talasa, mehanički podsystem, čiji je glavni deo bovni element, vertikalno pomera translatorni deo linearnog generatora. Uloga mehaničkog podsklopa je da prihvati što veći deo energije morskih talasa i preda je električnom podsystemu. Nadalje, električni podsystem odgovarajućom kontrolom ima zadatak da mehaničku energiju pretvori u električnu.

Električni podsklop, koji predstavlja glavni fokus ovog rada, sastoji se od linearne električne mašine koja ima dva osnovna dela. Statički deo, odnosno stator, ima namotaje, dok translatorni deo koga pokreće mehanički podsystem ima stalne magnete. Princip rada odabranog PMLG-a sličan je u poređenju sa rotacionom sinhronom mašinom sa stalnim magnetima, pri čemu je osnovna razlika u linearnom kretanju magnetnog polja u odnosu na statički deo mašine. PMLG i dalje zadržava naziv „sinhroni“ usled činjenice da je talasni oblik napona na krajevima namotaja sinhronizovan sa linearnim kretanjem generatora.



Slika 2. Vertikalni linearni generator za pretvaranje energije talasa

Stalni magneti se koriste da obezbede pobudno polje u PMLG-u. Sa konstrukcione strane, izbor dizajna PMLG-a uključuje dužinu translatornog dela, broj polova i faza, veličinu vazdušnog zazora, gustinu snage, kao i izbor tipa namotaja na statoru. Broj faza nije ograničen, ali uobičajeno je da se koristi trofazni PMLG pre svega zbog činjenice da je ovakav tip električne mašine u zreloj fazi istraživanja.

Zbog mehaničkih ograničenja, ovakve električne mašine imaju veliki i promenljiv vazdušni zazor. Slično kao u električnom kolu, gde električna struja prati putanju najmanjeg otpora, tako i magnetno polje prati putanju najmanje reluktanse, odnosno magnetnog otpora. PMLG zahteva stalne magnete sa velikim koercitivnim poljem,

koje predstavlja intenzitet magnetnog polja potrebnog da se magnetizacija tog materijala smanji na nulu nakon što je magnetizacija materijala dovedena do zasićenja. Kada materijal ima veliko koercitivno polje, teže se razmagnetiše, što rezultira da *PMLG* ima stabilna svojstva tokom vremena.

Na slici 3 prikazana je ekvivalentna šema statora. S obzirom da se u radu razmatra trofazni *PMLG*, ekvivalentna šema ima tri grane u kojima se redom nalazi indukovana elektromotorna sila, induktivnost i otpornost namotaja statora. Dodatno, na ekvivalentnoj šemi, modelovano je trofazno opterećenje sa otpornikom.

U priloženom modelu zanemarena je elektromagnetna sila u formulaciji diferencijalnih jednačina. Odnosno, razmatraju se struje u kolu bez uticaja koji ima na pokretni translator, pa je odgovarajući sistem diferencijalnih jednačina:

$$\frac{d}{dt} i_1 = \frac{e_1 - v_1 - i_1 R_a}{L_s} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} i_2 = \frac{e_2 - v_2 - i_2 R_a}{L_s} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_3 = \frac{e_3 - v_3 - i_3 R_a}{L_s} \quad (3)$$

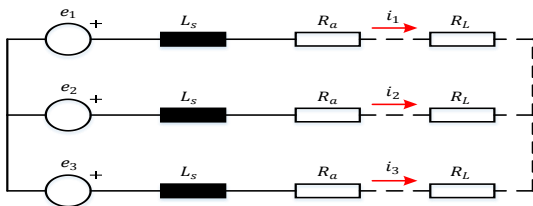
gde su $i_{1,2,3}$ fazne struje, $e_{1,2,3}$ fazne indukovane elektromotorne sile, $v_{1,2,3}$ fazni naponi generatora, R_a otpor svake faze armaturnih kola i L_s sinhrona induktivnost u svakoj fazi.

Da bi model bio kompletan, ovim jednačinama treba dodati i jednačine promene pomeraja i brzine u vremenu.

U tabeli 1 su prikazani svi parametri generatora neophodni za modelovanje uređaja za pretvaranje energije morskih talasa u električnu. U cilju razumevanja i kvantifikovanja performansi *PMLG*-a, neophodan je matematički model dolaznog talasa.

U modelu se pretpostavlja da je talas sinusoidalan i da je amplituda brzine talasa (u_m), koja predstavlja maksimalnu vertikalnu brzinu talasa, 2,2 m/s, dok je perioda talasa (T) 12,6 s.

$$u(t) = U_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (4)$$



Slika 3. Ekvivalentno kolo trofaznog namotaja generatora

U modelu je uvažena masa bovnog elementa u iznosu od $M = 1000$ kg. Pri kretanju bovnog elementa, povlači (pomera) se određena količina vode. Ova pojava dovodi do izraza dodatnih masa, što je masa vode koja se pomera zajedno sa bovnim elementom kako on osciluje u vodi. Kada se formuliše dinamički model sistema bovnog elementa, masa koja se koristi jeste zbir mase bovnog elementa i dodane mase.

Dodatna masa bovnog elementa $m_r(\infty)$ u ovom radu je 289 kg. Kako se bovni element kreće u odnosu na vodu, otpor zračenja R_r , koji zavisi od geometrije bovnog

elementa i frekvencije talasa, imaće uticaj na kretanje bovnog elementa. Izračunato je da parametar R_r iznosi 16 Ns/m. Pored toga, viskozno prigušenje R_v će takođe igrati ulogu u dinamici, i za njega je izračunato da iznosi 717 Ns/m.

Tabela 1. Parametri generatora

Ime	Simbol	Vrednost	Jedinica
Broj faza	m	3	
Broj polova	p	6	
Broj proreza	q	1	
Broj navojaka po kalem	N	82	
Broj delova statora - armatura	M_s	4	
Dužina jezgra statora	L	0,432	m
Širina statora	W_s	0,2	m
Vazdušni zazor	g_a	0,002	m
Visina magneta	h_m	0,006	m
Dozvoljena gustina fluksa u jezgru translatorskog dela	B_r	1,2	T
Koercitivno polje	H_c	905000	A/m
Otpor armature	R_a	1,5	Ω
Otpor opterećenja	R_L	7,5	Ω
Sinhrona induktivnost	L_s	0,115	H

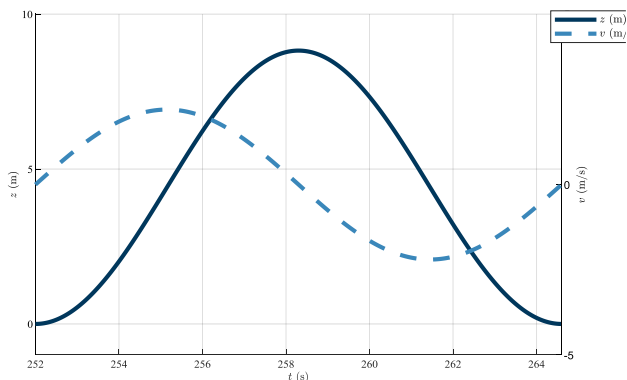
4. ANALIZA REZULTATA

Na osnovu matematičkog modela opisanog u prethodnoj glavi, kreiran je model u *MATLAB* softverskom okruženju korišćenjem *.m* skripte. Simuliran je model *PMLG*-a, koji ne uključuje elektromagnetnu silu. Simulacija je trajala 350 sekundi, a vremenski period od primarnog interesa u ovom radu je između 250-350 s.

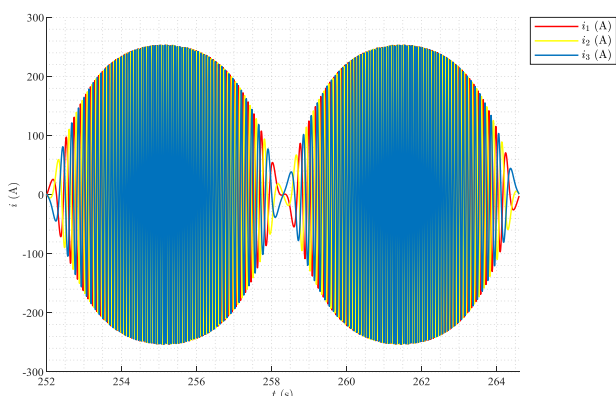
Nakon 250 s, sistem je imao dovoljno vremena da dostigne ustaljeno stanje na osnovu koga se može vršiti analiza veličina od interesa. Slike 4, 5 i 6 su skalirane, tako da je prikazan tačno jedan period u ustaljenom stanju. Pomeraj z je uvek pozitivan, dok je brzina v simetrična oko 0.

Maksimalna i minimalna vrednost pomeraja z su 8.8235 m i 0, respektivno. Brzina v ima amplitudu od 2,2 m/s, odnosno -2,2 m/s. Fazne struje su simetrične oko 0, sa amplitudom u iznosu od 253.2 A, odnosno -253.2 A. Kao što se može primetiti, vremenska konstanta električnog podsistema je mnogo manja od vremenske konstante mehaničkog podsistema (tj. pomeraj i brzina), što je i očekivano.

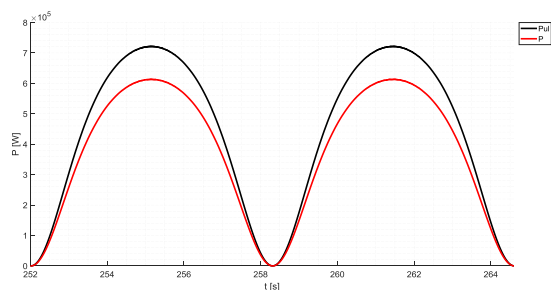
Slika 6 opisuje izlaznu snagu sistema, koja se kreće u opsegu od 0 do 613,32 kW. U stvarnosti, bez odgovarajuće kontrole, izlazna snaga bi imala i „negativne“ vrednosti, odnosno sistem bi se ponašao kao generator ili motor u zavisnosti od referentnog smera kretanja linearnog sistema. Srednja snaga predstavljenog sistema iznosi 375,90 kW.



Slika 4. Odstavak pomicanja i brzine translatorskog dela tokom jedne periode



Slika 5. Odstavak faznih struja generatora tokom jedne periode



Slika 6. Odstavak izlazne snage generatora tokom jedne periode

5. ZAKLJUČAK

Zamena fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije ima veliki uticaj na uspešno rešavanje globalnih ekoloških problema. Zaustavljanje klimatskih promena, koje mogu uzrokovati velike katastrofe, je trenutno jedan od najozbiljnijih problema sa kojim se čovečanstvo suočava,

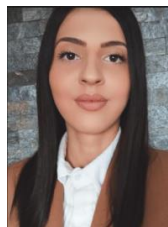
Najznačajniji način za rešavanje ovog problema je korišćenje obnovljivih izvora energije u što većem procentu. Tehnologije iskorišćavanja obnovljivih izvora energije su svakim danom ekonomski sve isplativije i konkurentnije na tržištu, što otklanja strahove da će prelazak sa fosilnih goriva imati negativan uticaj na ekonomiju.

Okeani i mora imaju neverovatan energetska potencijal koji se premalo koristi, ali napretkom tehnologije postaje moguće u sve većoj meri iskoristiti ovaj, možda, beskonačni izvor energije. Odstavi u ovom radu, dobijeni modelovanjem linearnog uređaja za konverziju energije morskih talasa, pokazuju dobre rezultate i mogućnost da se električna energija predaje u mrežu korišćenjem uređaja energetske elektronike uz odgovarajuću kontrolu. U fokusu daljeg istraživanja bila bi napredna kontrola u cilju postizanja veće energetske efikasnosti i pouzdane isporuke električne energije.

6. LITERATURA

- [1] "Overview of global energy", dostupno na <https://ourworldindata.org/energy-overview>
- [2] A. Muetze and J. G. Vining, "Ocean Wave Energy Conversion – A Survey," in Industry Application Conference, Tampa Florida, 2006, pp. 1410–1417.
- [3] J. G. Vining and A. Muetze, "Economic Factors and Incentives for Ocean Wave Energy Conversion," in Conference record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference: forty-second IAS annual meeting ; September 23 - 27, 2007, New Orleans, Louisiana, USA, 2007, pp. 756–763.
- [4] "Wave devices", dostupni na <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
- [5] Fernando Herrera, Javier Pereda, Pablo Bravo and Felix Rojas, "Wave Energy Conversion: Overview and Control of a Permanent Magnet Linear Generator" - CHILECON 2019, October 29-31, Valparaiso, Chile

Kratka biografija:



Milena Aleksić je rođena u Valjevu 1995. god. Osnovne akademske studije je upisala na Fakultetu tehničkih nauka 2014. god, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije. Diplomski rad je odbranila 2018. godine iz oblasti Elektroenergetika – Obnovljivi izvori električne energije.
kontakt: milenaleksic95@gmail.com



Boris Dumnić rođen je 1976. godine. Zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka, Departmanu za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Katedri za energetska elektroniku i pretvarače. Oblasni interesovanja su mu električne mašine, pogoni, energetska elektronika i obnovljivi izvori električne energije.