



OPTIMIZACIJA EFIKASNOSTI BOOST PRETVARAČA U VJETROELEKTRANI

Željko Ivanović, Branko Dokić, Branko Blanuša, Mladen Knežić
Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, RS-BiH

Sadržaj: U radu je predložena tehnika promjenljive prekidačke frekvencije boost pretvarača u cilju optimizacije njegove efikasnosti u vjetroeletktrani. Predloženo rješenje odnosi se na topologiju vjetroeletktrane koja ima generator sa permanentnim magnetom i boost pretvaračem. Tehnikom promjenljive frekvencije postiže se veća efikasnost pretvarača kada je snaga generatora manja od nazivne, što je čest slučaj u vjetroeletktranama. Predloženo rješenje je verifikovano računarskom simulacijom i eksperimentalnim mjerenjima na prototipu manje snage.

Ključne reči: boost pretvarač/ vjetroeletktrana/ efikasnost/optimizacija

1. UVOD

Udio električne energije dobijene iz energije vjetra neprekidno raste [1,2]. Razvoj uređaja za korištenje energije vjetra (vjetroeletktrana) odvija se u više pravaca: izbor tipa generatora (sinhroni ili asinhroni), pretvarača energetske elektronike, te postupaka upravljanja dijelovima vjetroeletktrane i cijelim sistemom. Veoma je intenzivan razvoj i primjena vjetroeletktrane sa sinhronim generatorima sa permanentnim magnetima (PMG) koji se danas sve češće koriste. Prednost vjetroeletktrane koje koriste generatore sa permanentnim magnetima u odnosu na ostale vrste je u jednostavnosti održavanja generatora. Nedostaci generatora sa permanentnim magnetima su velike dimenzije i težina, nemogućnost rada pri temperaturama višim od kritične zbog korištenja permanentnih magneta i zavisnost napona i frekvencije generatora od brzine obrtanja, tj. od brzine vjetra. Zbog posljednje osobine, vjetroeletktrane sa sinhronim generatorima sa permanentnim magnetima moraju da posjeduju složene pretvarače energetske elektronike za kontrolisanje toka proizvedene energije prema mreži.

Topologija vjetroeletktrane u kojoj se koristi boost pretvarač opisana je u drugom poglavlju. U trećem i četvrtom poglavlju predložena je primjena tehnike promjenljive prekidačke frekvencije u cilju povećanja efikasnosti boost pretvarača pri snagama generatora manjim od nazivne. Ova tehnika se zasniva na činjenici da je moguće smanjiti prekidačku frekvenciju pri snagama manjim od nazivne, a da se značajno ne naruše uslovi koji su korišteni prilikom projektovanja pretvarača za rad sa nazivnom snagom (napon brujanja, izbor jezgra prigušnice itd.). Predloženi koncept verifikovan je računarskom simulacijom boost pretvarača korištenjem

PSpice-a i eksperimentalnim mjerenjima na prototipu manje snage, što je dato u petom poglavlju ovog rada.

2. TOPOLOGIJA VJETROELEKTANE SA BOOST PRETVARAČEM

Jedna od korištenih topologija vjetroeletktrane sa PM generatorom (pogotovo kod vjetroeletktrane manjih snaga) realizuje se kao kaskadna veza sinhronog generatora, ispravljača, boost pretvarača i mrežnog invertora (Sl. 1.).

Snaga vjetroturbine koja se predaje generatoru može se odrediti na osnovu relacije (1).

$$P_{TUR} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_p \cdot (\lambda, \beta) \cdot V_v^3 \quad (1)$$

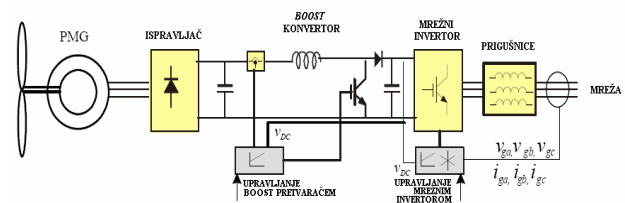
gdje su:

- ρ – gustina vazduha,
- S – površina koju opisuje vrh lopatica turbine,
- V_v – brzina vjetra,
- $C_p(\lambda, \beta)$ – koeficijent snage turbine,
- λ – odnos periferne brzine elise turbine i brzine vjetra,
- β – ugao zakrenutosti elisa (eng. *pitch angle*).

Vjetrogenerator je sinhroni generator sa permanentnim magnetima za koje se može uzeti da je fluks Φ konstantan. Indukovana elektromotorna sila E_o je proporcijalna brzini vjetra V_v , što se vidi iz relacije (2).

$$E_o = C_e \Phi V_v \quad (2)$$

Ulazni napon pretvarača je ispravljeni napon sinhronog generatora. Uloga pretvarača je da pri brzinama vjetra manjim od nazivne, podigne ispravljeni napon sinhronog generatora i na taj način održava približno konstantan napon jednosmjernog (DC) međukola mrežnog invertora, čime omogućava njegov povoljniji rad [8].



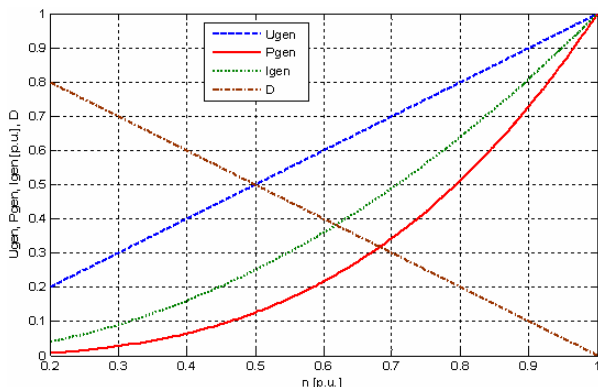
Sl. 1. Topologija vjetroeletktrane sa PMG generatorom.

Regulacijom rada pretvarača i mrežnog invertora može se kontrolisati tok energije od generatora prema mreži [3,4].

Naponski kontrolisani invertori (*Voltage Source Inverters* - VSI) se često koriste za povezivanje naizmjeničnog potrošača na jednosmjerni izvor. Razvoj veoma snažnih i visokofrekventnih poluprovodnika, kao što je IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristors*), omogućio je primjenu VSI u veoma snažnim aplikacijama. Povezivanje obnovljivog izvora na mrežu je glavna oblast primjene VSI [8].

Za efikasan rad vjetroturbine brzina obrtanja treba da se mijenja proporcionalno sa brzinom vjetra. Napon i struja na priključcima ispravljača koji su u funkciji brzine vjetra, treba da prate optimalne krive koje su prikazane na Sl. 2. (U_{gen} i I_{gen}). Idealna radna brzina može se postići podešavanjem električnog opterećenja sistema, a samim tim i momentom vratila mašine.

Sa promjenom brzine vjetra mijenja se i maksimalna snaga koju generator može da razvije (Sl. 2.).



Sl. 2. Zavisnost maksimalne snage P_{gen} , napona U_{gen} , struje I_{gen} vjetrogeneratora i faktora popune D pretvarača od brzine vjetra.

Promjena faktora popune prekidačkih impulsa pretvarača kompenzuje promjenu ulaznog napona, odnosno napona generatora usljed promjene brzine vjetra, održavajući na taj način konstantan napon jednosmjernog međukola invertora (Sl. 2.).

3. GUBICI U BOOST PRETVARAČU

Pretvarač prenosi ukupnu energiju proizvedenu u vjetrogeneratoru i njegovi gubici utiču na ukupnu efikasnost vjetroelektrane. Zbog toga je bitno da se ovom pretvaraču, što je moguće više, poveća efikasnost. Ovome ide u prilog i činjenica da se efikasnost pretvarača značajno mijenja sa promjenom izlazne snage, što je tipična situacija u vjetroelektranama. Izlazna snaga generatora mijenja se sa promjenom brzine vjetra. Povećavanje efikasnosti pretvarača značajno doprinosi povećavanju efikasnosti cijele vjetroelektrane.

Energetski gubici u elementima pretvarača mogu se podijeliti na: kondukcione, dinamičke i fiksne gubitke (Tabela 1.). Ukupna snaga gubitaka P_{loss} data je relacijom (3).

$$P_{loss} = P_{cond} + P_{fixed} + W_{TOT} \cdot f_{sw}, \quad (3)$$

gdje su:

P_{cond} - kondukcioni gubici koji su direktno zavisni od struje opterećenja i veoma malo zavise od prekidačke frekvencije f_{sw} ,

P_{fixed} - fiksni gubici koji ne zavise od prekidačke frekvencije i opterećenja (npr. snaga napajanja upravljačkog kola invertora),

W_{TOT} - je ukupna energija dinamičkih gubitaka u toku jednog perioda ($W_{transistor}, W_{diode}, W_{core}$).

Proizvod $P_{sw} = W_{TOT} \cdot f_{sw}$ predstavlja ukupnu snagu dinamičkih gubitaka koji su, kao što možemo vidjeti, direktno proporcionalni prekidačkoj frekvenciji f_{sw} .

Tabela 1. Gubici u boost pretvaraču.

Kondukcioni gubici	Dinamički gubici	Fiksni gubici
-otpornost uključenog MOSFET-a R_{on}	-MOSFET C_{oss} -MOSFET C_{iss} -kapacitivnost diode	-snaga napajanja kontrolera -struja curenja MOSFET-a, diode i kondenzatora
-napon provodne diode V_F	-naelektrisanje sporednih nosilaca u diodi	
-otpornost prigušnice R_L	-gubici u jezgru kalema	
-otpornost konden. ESR	-gubici <i>snubber</i> kola	
	-gubici drajvera MOSFET-a	

4. TEHNIKA PROMJENLJIVE FREKVENCIJE

Ograničavajući faktor pri povećanju prekidačke frekvencije su dinamički gubici na prekidačima. S druge strane, da bi se smanjile dimenzije i povećala gustina snage energetskih pretvarača potrebno je povećati prekidačku frekvenciju, jer se na taj način smanjuju dimenzije kondenzatora i magnetskih komponenata. U zavisnosti od vrijednosti prekidačke frekvencije dinamički gubici mogu biti značajni i pri nazivnoj snazi pretvarača. Međutim, pri manjim snagama, dinamički gubici su značajan izvor gubitaka u pretvaračima sa fiksnom frekvencijom [5,7].

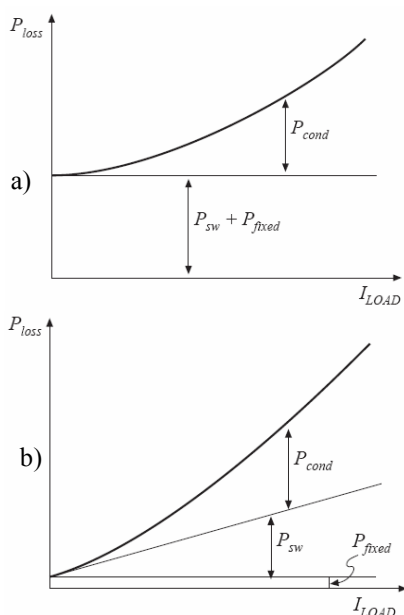
Kada *boost* pretvarač radi u kontinualnom režimu, izlazni napon V_o dat je relacijom (4).

$$V_o = V_{gen} / (1 - D) \quad (4)$$

Iz relacije (4) se vidi da izlazni napon pretvarača ne zavisi od frekvencije prekidačkih impulsa, nego isključivo od faktora popune i ulaznog napona V_{gen} . U idealnom slučaju promjenom frekvencije prekidačkih impulsa ne utiče se na promjenu izlaznog napona, dok u realnosti postoji zavisnost izlaznog napona sa promjenom prekidačke frekvencije.

U slučaju konvencionalnog pristupa kada je prekidačka frekvencija fiksna i nezavisna od opterećenja onda su i dinamički gubici P_{sw} fiksni (Sl. 3.a). Međutim, ako se prekidačka frekvencija mijenja sa promjenom opterećenja, onda će se mijenjati i dinamički gubici. Na taj način se, u zavisnosti od opterećenja, postižu frekventno zavisni gubici kao što je prikazano na Sl. 3.b.

U cilju poboljšavanja efikasnosti pretvarača predloženo je da se pri promjeni brzine vjetra, tj. pri promjeni snage generatora, u slučajevima kada je to dozvoljeno, mijenja i vrijednost prekidačke frekvencije.



Sl. 3. Promjena gubitaka pretvarača sa strujom opterećenja: a) u konvencionalnom pretvaraču sa fiksnom prekidačkom frekvencijom; b) u pretvaraču u kome je prekidačka frekvencija proporcionalna struji opterećenja.

5. REZULTATI SIMULACIJE I MJERENJA

U cilju verifikacije predloženog koncepta upravljanja projektovan je *boost* pretvarač snage 1kW. Specifikacije pretvarača su:

- DC ulazni napon V_{in} : 100-320V,
- DC izlazni napon V_{out} : 320V (0-100% opterećenja),
- Snaga P_o : 1kW,
- Max f_{sw} : 100kHz
- Talasnost izlaznog napona: $\Delta V_{out} < 3.2V$

Jezgro prigušnice je načinjeno od feritnog materijala N67 sa procijepom od 1mm. Materijal N67 omogućava rad na frekvencijama do 300kHz. Za maksimalnu radnu vrijednost magnetne indukcije usvojena je vrijednost od $B_{max}=100mT$, iako maksimalna indukcija materijala oko 400mT. To je učinjeno zbog smanjenja gubitaka unutar jezgra prigušnice.

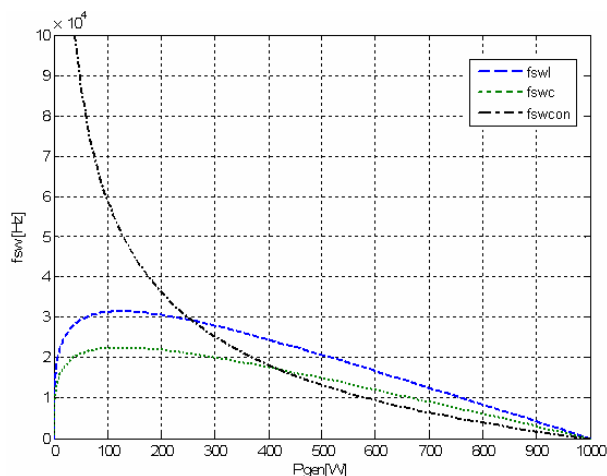
Simulaciona i eksperimentalna provjera predložene tehnike, za specificirani *boost* pretvarač, izvedena su uvažavajući ograničenja prikazana na Sl. 4. U zavisnosti od ulazne snage pretvarača P_{gen} , na Sl.4. je prikazana:

- minimalna prekidačka frekvencija f_{swc} koja je određena na osnovu uslova specificirane talasnosti izlaznog napona ΔV_{out} ,
- minimalna prekidačka frekvencija f_{swl} koja je određena na osnovu uslova maksimalno dozvoljene radne indukcije u jezgu prigušnice B_{max} ,
- potrebna prekidačka frekvencija f_{swcon} da pretvarač radi na granici kontinualne i diskontinualne oblasti ($I_{gen}=I_{Lavg}=\Delta i_L/2$).

Za ispunjenje uslova ΔV_{out} i B_{max} , sa Sl. 4. možemo zaključiti da je potrebno da minimalna prekidačka učestanost bude veća od f_{swl} .

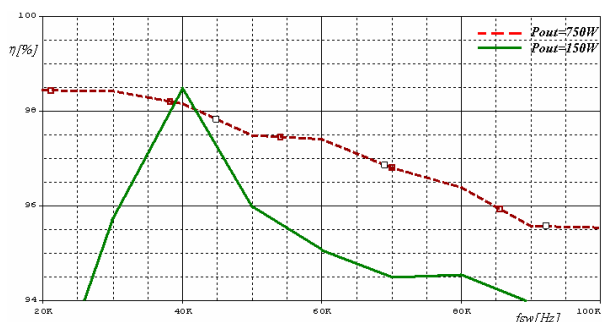
Rad pretvarača je simuliran za različite vrijednosti izlazne snage (750W i 150W) i prekidačke frekvencije (10kHz-100kHz). Prilikom simulacije i eksperimentalnih

mjerenja promjene ulaznog napona i faktora popune pretvarača mijenjali su se prema karakteristikama prikazanim na Sl. 2., dok je izlazni napon održavan oko 320V. Za simulaciju pretvarača korišten je *PSpice* iz *OrCAD* programskog paketa v.15.7.



Sl. 4. Zavisnost minimalne prekidačke frekvencije od ulazne snage.

Na Sl. 5. prikazani su rezultati simulacije, odnosno zavisnost efikasnosti pretvarača u funkciji prekidačke frekvencije za dva slučaja ulazne snage pretvarača (750W i 150W). Za slučaj kada je ulazna snaga 750W, može se vidjeti da za vrijednosti prekidačke frekvencije u opsegu od 20-100kHz pretvarač radi u kontinualnom režimu (Sl. 4.). Takođe, u tom slučaju vidi se da efikasnost pretvarača opada sa povećanjem prekidačke frekvencije (Sl. 5.).

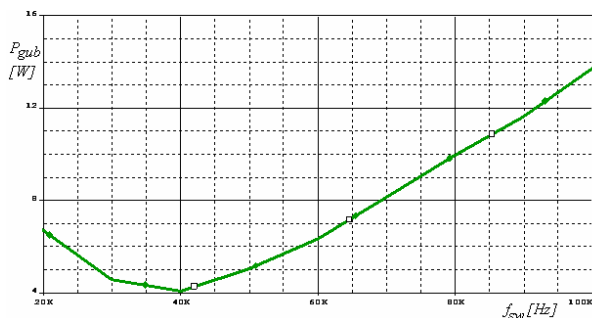


Sl. 5. Efikasnost *boost* pretvarača u funkciji prekidačke frekvencije u slučaju kada je ulazna snaga pretvarača 750W i 150W.

U slučaju kada je ulazna snaga pretvarača 150W granica kontinualne i diskontinualne oblasti je pri prekidačkoj frekvenciji od oko 40kHz (Sl. 4.). Takođe, pri toj frekvenciji pretvarač ima i maksimalnu efikasnost (Sl. 5.).

Pri manjim opterećenjima i manjim prekidačkim frekvencijama pretvarač može da uđe u diskontinualni režim rada (kao što se vidi za slučaj kada je ulazna snaga 150W i $f_{sw} < 40kHz$). U diskontinualnom režimu usljed većih strujnih promjena kroz elemente pretvarača dolazi i do većih kondukcionih gubitaka. Takođe, u diskontinualnom režimu, uz konstantan faktor popune prekidačkih impulsa, izlazni napon pretvarača se povećava sa smanjenjem prekidačke frekvencije.

Na Sl. 6. prikazana je zavisnost snage gubitaka P_{gub} pretvarača od vrijednosti prekidačke frekvencije kada je ulazna snaga 150W. Sa Sl. 6. se vidi da je snaga gubitaka minimalna pri frekvenciji oko 40kHz, što je bilo i očekivano, jer je pri toj frekvenciji maksimalna efikasnost (Sl. 5.). Za prekidačke frekvencije manje od 40kHz pretvarač odlazi dublje u diskontinualnu oblast usljed čega se javljaju veće strujne promjene koje prouzrokuju veće kondukcione gubitke i smanjuju efikasnost pretvarača. Za frekvencije veće od 40kHz dolazi do povećanja prekidačkih gubitaka a samim tim i ukupnih gubitaka u pretvaraču.



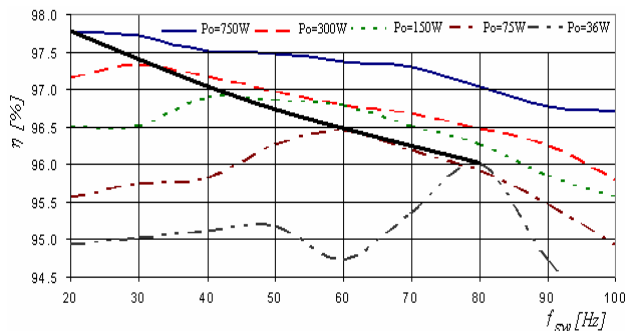
Sl. 6. Zavisnost gubitaka P_{gub} boost pretvarača od prekidačke frekvencije f_{sw} .

Na osnovu rezultata simulacije može se zaključiti da će pretvarač imati najveću efikasnost ako radi oko granice kontinualne i diskontinualne oblasti (f_{swcon} karakteristika), što znači da je optimalna prekidačka frekvencija jednaka frekvenciji koja je potrebna da bi pretvarač radio na granici kontinualne i diskontinualne oblasti ($f_{swopt}=f_{swcon}$). Međutim, pri snagama između 250 i 1000W moraju biti zadovoljeni uslovi talasnosti izlaznog napona i maksimalno dozvoljene indukcije. U tom slučaju sa Sl. 4. se vidi da je potrebno da prekidačka frekvencija bude veća od f_{swcon} , odnosno mora da bude ispunjeno: $f_{swopt} \geq f_{swl}$. Zbog zadržavanja dinamičkih karakteristika prekidačka frekvencija je ograničena sa donje strane sa vrijednošću od 20kHz.

U cilju verifikacije rezultata simulacije realizovan je prototip specificiranog pretvarača. Prilikom eksperimentalnih mjerenja umjesto sinhronog generatora korišten je autotransformator, dok je kao opterećenje pretvarača korišten promjenljivi otpornik. Efikasnost pretvarača mjerena je pomoću PC računara i akvizicione kartice ED428.

Na Sl. 7. prikazana je efikasnost realizovanog pretvarača u funkciji prekidačke frekvencije pri različitim ulaznim snagama pretvarača. Rezultati sa Sl. 7. dobijeni su eksperimentalnim mjerenjima na realizovanom prototipu.

Eksperimentalna mjerenja su potvrdila ono što se dobilo putem simulacije. Povezivanjem tačaka maksimalne efikasnosti na Sl. 7. (puna crna linija) dobija se optimalna promjena prekidačke frekvencije sa promjenom ulazne snage pretvarača.

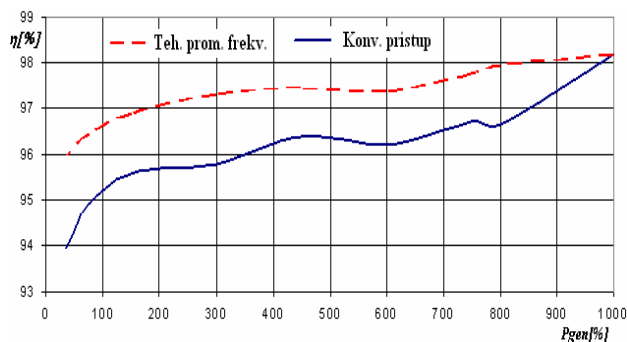


Sl. 7. Eksperimentalna dobijena zavisnost efikasnosti od prekidačke frekvencije i ulazne snage boost pretvarača.

U slučaju konvencionalnog pristupa prekidačka frekvencija je fiksna (npr. 100kHz) i poželjno je da bude što veća radi povećanja gustine snage. U Tabeli 2. dat je pregled efikasnosti i snage gubitaka u slučaju korištenja konvencionalnog pristupa i predložene tehnike promjene prekidačke frekvencije, dobijenih eksperimentalnim putem. U slučaju konvencionalog pristupa pri smanjenju ulazne snage (npr. sa 750W na 300W) prekidačka frekvencija osta je ista, tj. 100kHz, dok se predloženom tehnikom ona mijenja u cilju postizanja maksimalne efikasnosti uz zadržavanje zahtjevane talasnosti ΔV_{out} i maksimalne indukcije B_{max} . Pri ulaznoj nazivnoj snazi pretvarača (u našem slučaju 1kW), sa Sl. 2. se vidi, da je potrebni faktor popune jednak nuli. Ovo znači da pretvarač ne radi, pa je i prekidačka frekvencija, takođe jednaka nuli. U tom slučaju postoje samo kondukcioni gubici na prigušnici, diodi i serijskoj otpornosti kondenzatora, što rezultuje najvećom efikasnošću pretvarača. Na Sl. 8. prikazana je grafička zavisnost efikasnosti pretvarača od ulazne snage, koja je dobijena na osnovu podataka iz Tabele 2.

Tabela 2. Eksperimentalni rezultati.

$P_{gen}[W]$	Konv. teh. ($f_{sw}=100kHz$, osim za 1kW)		Teh. prom. frekv.		
	η [%]	$P_{loss}[W]$	$f_{sw}[kHz]$	η [%]	$P_{loss}[W]$
1000	98.19	18.43	0	98.19	18.43
800	96.67	27.56	20	97.96	16.66
750	96.72	25.43	20	97.77	17.10
600	96.20	23.70	20	97.38	16.14
450	96.39	16.85	20	97.45	11.77
300	95.78	13.22	30	97.32	8.26
150	95.58	6.94	40	96.89	4.81
75	94.93	4.00	60	96.45	2.76
36	93.94	2.32	80	96.00	1.50



Sl. 8. Ekperimentalno dobijena zavisnost efikasnosti pretvarača od ulazne snage u slučaju konvencionalnog pristupa i predložene tehnike promjenljive frekvencije.

6. ZAKLJUČAK

Vjetroelektrane često rade sa snagama manjim od projektovane. Na primjer, tipična raspodjela vjetra može imati centar na 25%-35% nazivne snage [6]. Za ekonomsku opravdanost vjetroelektrane veoma je važno da iskorištenje energije bude maksimalno. To je razlog zbog čega je bitno postići efikasnost sistema i pri snagama manjim od nazivne.

Primjenom predložene tehnike promjene prekidačke frekvencije sa promjenom snage vjetra može se povećati efikasnosti pretvarača pri snagama manjim od nazivne, što je i potvrđeno simulacijom i eksperimentalnim mjerenjima. Na taj način povećava se i efikasnost vjetroelektrane čije je pretvarač sastavni dio. Ovo omogućuje da se energija vjetra, pri manjim brzinama, bolje iskoristi.

7. LITERATURA

- [1] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Zhe Chen, Marco Liserre, "Power Converters and Control of Renewable Energy Systems", First International Conference of Energy Innovation, Barcelona, Spain, 2005.
- [2] Charles Lemogo Kana, Manoharan Thamodharan, Albrecht Wolf, "System Management of a Wind -Energy

Converter", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 3, MAY 2001.

- [3] F. Blaabjerg, Z. Chen, R. Teodorescu, F. Iov, "Power Electronics in Wind Turbine Systems", Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC apos;06. CES/IEEE 5th International, Volume 1, Issue , Aug. 2006 Page(s):1 – 11.
- [4] Chem Nayar, Hooman Dehbonei, Liuchen Chang, "A Low Cost Power Electronic Interface for Small Scale Wind Generators in Single Phase Distributed Power Generation System", AUPEC'05 , University of Tasmainia, Hobart, Tasmania, Australia, 25th - 28th September 2005.
- [5] R. Erickson, S. Angkititrakul, K. Almazeedi, "A New Family of Multilevel Matrix Converters for Wind Power Application: Final Report", R. Erickson, S. Angkititrakul, and K. Almazeedi, University of Colorado Boulder, Colorado, July 2002-March 2006.
- [6] Osama Al-Naseem, Robert W. Erickson, Palmer Carlin, "Prediction of Switching Loss Variations by Averaged Switch Modeling", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE.
- [7] Barry Arbetter, Robert Erickson, Dragan Maksimović "DC-DC Converter Design for Battery-Operated Systems", IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1995 Record, June 1995.
- [8] Z. Chen, E. Spooner, „Voltage Source Inverters for High-Power, Variable-Voltage DC Power Sources“, IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib., Vol. 148, No. 5. September 2001.

BOOST CONVERTER EFFICIENCY OPTIMIZATION IN WIND TURBINE

Abstract: *Technique of variable switching frequency for improvement converter efficiency is proposed in this paper. Topology of wind turbine with PMG and boost converter is suitably for this solution. Techniques of variable switching frequency improve efficiency especially when the output power of generator is less than rated value. This solution is verified through simulation and experimental tests.*

Key words: *Boost converter, wind turbine, efficiency, optimization.*