

Enes ZEJNILOVIĆ¹, Vladan VUJIČIĆ², Martin ČALASAN³

ANALIZA RADA I MOGUĆNOST PRIMJENE V-C GENERATORA U OFFSHORE VJETROELEKTRANAMA

Sažetak: Iskorišćenje obnovljivih izvora energije predstavlja jedan od glavnih zadataka vlada širom svijeta. Vjetar je jedan od obnovljivih izvora energije od kojeg se očekuje veliki komercijalni interes. V-C generator (Variable Capacitance Generator) postaje ozbiljan kandidat za primjenu u sistemima offshore vjetroelektrana. U ovom radu je prikazana mogućnost primjene, i analiza rada, V-C generatora kod offshore vjetroelektrana, direktno konektovane na visokonaponske jednosmjernne sisteme (HVDC). Analiza je sprovedena upotrebom programskog paketa Matlab.

1. UVOD

Energetika je oblast privrede od koje u velikoj mjeri zavisi razvoj društva u budućnosti. Danas se srećemo sa situacijom da trend rasta potreba za električnom energijom na globalnom nivou iznosi 2,8% godišnje i da eksploatacija primarnih izvora energije ne može ispratiti takvu potražnju za električnom energijom. A sa druge strane, eksploatacija fosilnih goriva će eventualno dovesti do iscrpljenja njihovih rezervi. Zbog toga se sve veći broj zemalja u svijetu okreće obnovljivim izvorima energije.

Vjetar je jedan od obnovljivih izvora energije koji je veoma aktuelan posljednjih godina. Proizvodnja električne energije iz vjetra doživjela je nagli porast tokom naftne krize početkom sedamdesetih godina prošlog vijeka, ali je tek osam-

¹ Spec. sc. Enes Zejniliović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore, Džordža Vašingtona bb, Podgorica

² Prof. dr Vladan Vujičić, Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore, Džordža Vašingtona bb, Podgorica

³ Mr Martin Čalasan, Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore, Džordža Vašingtona bb, Podgorica

desetih godina doživjela izuzetan rast primjenom novih tehnoloških dostignuća. Ovaj rad se posredno bavi pitanjem iskorišćavanja energije vjetra.

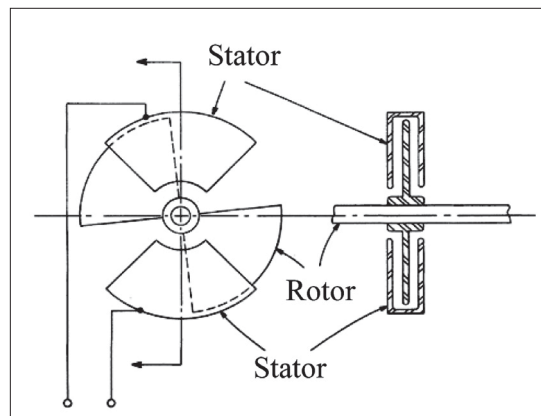
U prvom dijelu ovog rada biće riječi o HVDC prenosnom sistemu energije, njegovim prednostima i manama. HVDC sistem se koristi za prenos energije proizvedene u vjetroelektrana, posebno je značajan kod *offshore* vjetroelektrana. U drugom dijelu rada će biti objašnjen princip rada V-C generatora i principijelna šema njegove konekcije sa HVDC sistemom. Posljednje poglavlje je posvećeno analizi rada V-C generatora kada napaja potrošač konstantnog napona.

2. HVDC SISTEMI

Visokonaponski jednosmjerni sistemi (HVDC) predstavljaju trend u konekcijama energetskih sistema. Njihova glavna upotreba je pri konekciji značajno udaljenih sistema. Tačnije, na većim rastojanjima HVDC sistemi predstavljaju značajno jeftinije rješenje od naizmjeničnih sistema [1-3]. Isto tako, HVDC omogućava prenos električne energije između nesinhronizovanih naizmjeničnih sistema. Kao poseban značaj upotrebe HVDC sistema ističe se činjenica da se njegovom upotrebom povećava stabilnost sistema tako što sprečava širenje kvara iz jednog dijela mreže u drugi dio. Prema istraživanjima prikazanim u [3-4] ako je rastojanje *offshore* vjetroelektrane od obale veće od 25-50 km, prenos električne energije preko HVDC sistema je ekonomičniji u odnosu na konvencionalne prenosne sisteme.

3. V-C GENERATOR

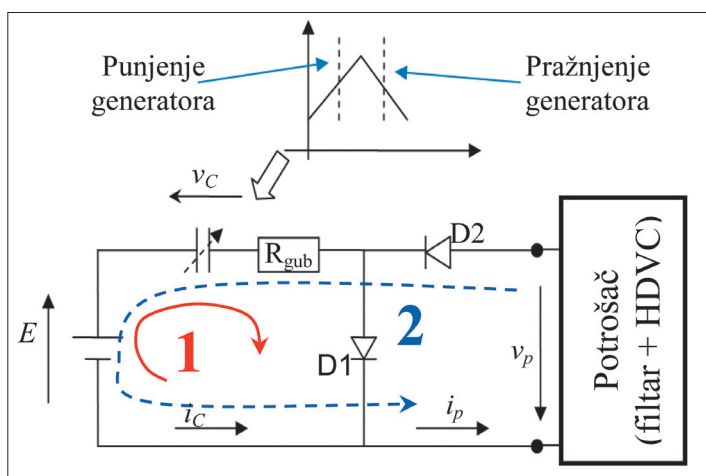
V-C generator radi na principu elektrostatičke konverzije energije, za razliku od konvencionalnih mašina čiji se rad zasniva na principu elektromagnetne kon-



Slika 1. Uzdužni i poprečni presjek V-C generatora

verzije energije. Stator i rotor ove mašine su zapravo ploče kondenzatora čija se kapacitivnost mijenja u zavisnosti od položaja rotora u odnosu na stator. Najjednostavnija izvedba ove mašine je prikazana na Slici 1.

Izvedba predstavljena na Slici 1 je poznatija kao „floating rotor” [5]. Stator V-C mašine se sastoji iz dva dijela kao što se vidi na slici. To su dva identična kružna isječka koji stoje jedan naspram drugog, a između njih se nalazi prostor ispunjen dielektrikom kroz koji prolazi rotor. Izlazni krajevi ova dva dijela statora priključuju se na prenosni vod preko energetske pretvarača. Kako se rotor okreće, i kapacitivnost V-C generatora se periodično mijenja, pri čemu se energija generalno predaje u intervalima kada kapacitivnost opada.



Slika 2. Simulacioni model V-C generatora i šema konekcije na HVDC

Na Slici 2 prikazano je osnovno kolo za priključenje V-C generatora na HVDC sistem. Generator je modelovan preko redne veze promjenljive kapacitivnosti i otpornosti gubitaka R_{gub} . Da bi se inicijalizovala proizvodnja energije, potreban je neki nezavisni jednosmjerni naponski izvor (E) koji obavlja funkciju pobude generatora. Preko dioda $D1$ i $D2$ vrši se punjenje, odnosno pražnjenje generatora, respektivno.

U toku punjenja, pobudni naponski izvor predaje energiju V-C generatoru. Prilikom pražnjenja, generator vraća pobudnom generatoru primljenu energiju, ali i predaje energiju potrošaču, pošto se tada strujna kontura zatvara kroz potrošača. Energija koju generator predaje potrošaču jednaka je razlici uložene mehaničke energije i gubitaka koji se javljaju u generatoru.

4. ANALIZA RADA V-C GENERATORA KONEKTOVANOG NA POTROŠAČ KONSTANTNOG NAPONA

Kapacitivnost V-C generatora je promjenjiva i zavisi od međusobnog položaja rotora u odnosu na stator [6-8]. Prema tome, trenutna vrijednost struje generatora ne zavisi samo od izvoda njegovog napona već i od izvoda kapacitivnosti, što se matematički može napisati kao:

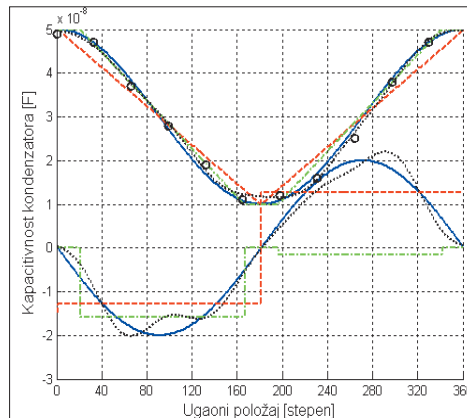
$$i_c = \frac{d(C \cdot v_c)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = v_c \cdot \frac{d(C)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + C \cdot \frac{d(v_c)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

gdje je $v_c = v_c(\theta)$ napon generatora, $C = C(\theta)$ kapacitivnost generatora, θ – pozicija rotora, a $d\theta/dt$ ugaona brzina rotora ($\omega_r = d\theta/dt$). Na osnovu izraza (1) može se napisati i izraz za trenutnu vrijednost snage V-C generatora:

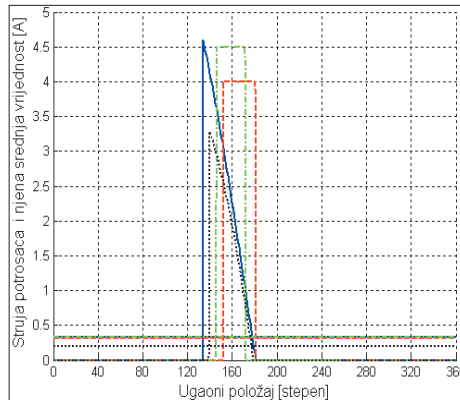
$$p = v_c^2 \cdot \frac{d(C)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + v_c \cdot C \cdot \frac{d(v_c)}{dt} \quad (2)$$

gdje se prvi dio odnosi na konverziju mehaničke u elektrostatičku energiju, a drugi dio na energiju koja cirkuliše kroz generator, tj. energiju koju generator u toku punjenja uzima, a u toku pražnjenja vraća sistemu.

Na slikama (3-5) plavom punom linijom su prikazani odzivi dobijeni simulacijom u programskom paketu Matlab kada je kapacitivnost sinusoidalna, crvenom iscrtkanom linijom kada je kapacitivnost trougaona, zelenom crta-tačka-crta ka-



Slika 3. Talasni oblici kapacitivnosti i njihovih izvoda

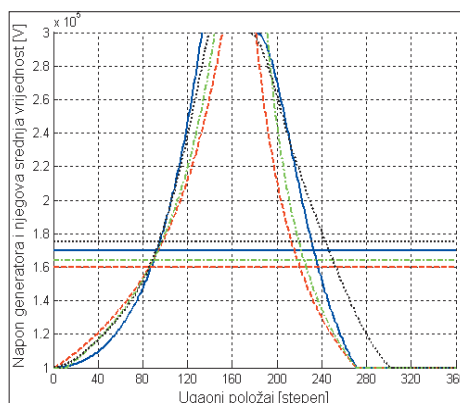


Slika 4. Struja potrošača i njen izvod kad je potrošač konstantni naponski izvor

da je kapacitivnost trapezoidna, a crnom istačkanom linijom kada je kapacitivnost zadata preko niza tačaka, koje su zatim interpolirane.

Svi grafici su dobijeni za vrijednost napona pobude od $E=100$ kV, minimalne kapacitivnosti $C_{min}=10$ nF, maksimalne kapacitivnosti $C_{max}=50$ nF i pri brzini od $n=10000$ ob/min. Vrijednost napona potrošača je 200 kV.

Na Slici 3 su prikazani oblici kapacitivnosti korišćeni u simulacijama. Na Slici 4 je prikazana struja generatora, dok je na Slici 5 prikazan napon V-C generatora. Sa Slike 5 se vidi da struja potrošača postoji samo kada je napon generatora jednak zbiru napona pobude i napona potrošača. Otpornost koja predstavlja gubitke zanemarena je u simulacijama.



Slika 5. Napon generatora za različite talasne oblike kapacitivnosti

U Tabeli 1 prikazana su poređenja optimalnih vrijednosti snaga V-C generatora, za različite talasne oblike kapacitivnosti, uz uslov da je maksimalni napon generatora manji od 500 kV.

Tabela 1. Poređenje optimalnih vrijednosti snaga V-C generatora za različite talasne oblike kapacitivnosti

Oblik kapacitivnosti	Konstantan napon
Sinusoida	P=311.54 kW (E=290 kV, Ud=200 kV)
Trougao	P=314.9 kW (E=290 kV, Ud=200 kV)
Trapez	P=317.62 kW (E=290 kV, Ud=200 kV)
Dobijen interpolacijom tačaka	P=262.52 kW (E=310 kV, Ud=180 kV)

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je bilo riječi o HVDC prenosnom sistemu energije, njegovim prednostima i manama u odnosu na standardne naizmjenične prenosne sisteme. Ukazano je na činjenicu da postoje neke situacije u kojima je HVDC sistem mnogo ekonomičnije i efikasnije rješenje, kao kod *offshore* vjetroelektrana.

Glavni dio rada posvećen je V-C generatoru, mašini koja bi zbog svojih karakteristika mogla biti veoma korisna u *offshore* vjetroelektranama konektovanim na HVDC sistem. Analiziran je rad V-C generatora u slučaju kada je napon potrošača konstantan. Za ovaj tip opterećenja prikazani su talasni oblici napona generatora i struje potrošača. Na kraju, prikazani su rezultati optimalnih vrijednosti snaga ovog generatora za različite talasne oblike kapacitivnosti.

LITERATURA

- [1] M. R. Patel: *Wind and Solar Power Systems*, CRC press, New York, 1999.
- [2] N. G. Hingorani: *High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse*, Spectrum IEEE, vol. 33, no. 5, pp. 63-72, April 1996.
- [3] D. M. Larruskain, I. Zamora, A. J. Mazón, O. Abarrategui, J. Monasterio: *Transmission and Distribution Networks: AC versus DC*, 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering, July 2005.
- [4] Michael P. Bahrman: *Overview of HVDC Transmission*, Power Systems Conference and Exposition, PSCE'06, pp. 18-23, Oct. 2006.
- [5] S. F. Hilp: *The Vacuum-Insulated, Varying capacitance Machine*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 12, no. 2, April 1977.
- [6] R. J. O' Donnell, N. Schofield, A. C. Smith, J. Cullent: *The Variable-Capacitance Machine for Off-shore Wind Generation*, in: *Proc. 6 th Int. Workshop Large-Scale Integr. Wind Power Transmiss. Netw. Offshore Wind Farms*, 2006, pp. 299-306.

- [7] R. O'Donnell, N. Schofield, A. C. Smith, J. Cullen: *Design Concepts for High-Voltage Variable-Capacitance DC Generators*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, no. 5, September/October 2009.
- [8] M. Čalasan, V. Vujičić: *Optimizacija opterećenja visokonaponskog elektrostatičkog generatora*, CG KO CIGRE, Budva, maj 2011.

THE WORK ANALYSIS AND POSSIBILITY OF APPLICATION OF V-C GENERATORS IN OFF-SHORE WIND POWER STATION

Abstract: The exploitation of renewable energy resources is at the forefront of many government policy agendas worldwide, with offshore wind being one such resource that is experiencing much commercial interest. V-C generator (Variable Capacitance generator) becomes a serious candidate for use in systems „off-shore” wind farms. The paper presents a feasibility study, and work analyse, that considers Variable- Capacitance (V-C) machines to be contenders for the direct generation of High Voltage Direct Current (HVDC) power in offshore wind farm applications. The analysis was performed using the program package Matlab.

