

SIMULACIJA RADA ELEKTROSTATIČKOG V-C GENERATORA U PRAZONOM HODU I KRATKOM SPOJU

Vladan Vujičić*, Martin Čalasan**

Ključne riječi: Elektrostatički generator, HVDC prenos energije, Prazan hod, Kratak spoj

Sažetak: Iako je princip rada elektrostatičkog V-C (*Variable Capacitance*) generatora odavno poznat, oblast njegove primjene do skoro praktično da nije ni postojala. Jedna od potencijalnih oblasti primjene V-C generatora, mogućnost o kojoj se u posljednje vrijeme sve više razmišlja, je u sistemima vjetrogeneratora koji se direktno priključuju na visokonaponski jednosmjerni (HVDC - High Voltage Direct Current) sistem. Zbog toga je, u ovom radu, značajna pažnja posvećena razmatranju osobina V-C generatora koje ga čine kandidatom za primjenu u HVDC sistemima. Pored toga, izvršena je analiza rada V-C generatora u režimima praznog hoda i kratkog spoja. Rezultati analize u skladu su sa prikazanim rezultatima simulacije.

1. UVOD

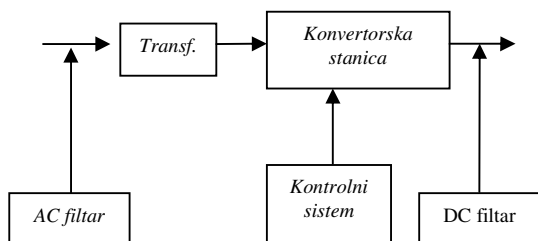
Iskorišćenje obnovljivih izvora energije predstavlja jedan od osnovnih zadataka vlada širom svijeta. Među tim izvorima, posebno mjesto zauzimaju vjetroelektrane (farme vjetrogeneratora). Upravo *offshore* vjetroelektrane predstavljaju jedan od energetske izvora od kojih se očekuje veoma veliki komercijalni interes u bliskoj budućnosti. Kada je rastojanje *offshore* vjetroelektrane od obale veće od 25-50km, prenos električne energije preko HVDC sistema je ekonomičniji u odnosu na konvencionalne prenosne sisteme. Glavne komponente HVDC sistema prikazane su na slici 1, dok je na slici 2 prikazan dijagram zavisnosti cijene prenosnog sistema od rastojanja, na koje se prenosi energija, kod HVDC sistema i kod visokonaponskih naizmjeničnih (High Voltage Alternating Current – HVAC) sistema.

HVDC sistem je konkurentan HVAC sistemima u mnogim situacijama. Negativne strane naizmjeničnog prenosa energije (gubici, fazni pomjeraji, itd) razmatrane su u [1]. Glavni razlozi upotrebe HVDC sistema i njihove prednosti u odnosu na AC sisteme, razmatrani su

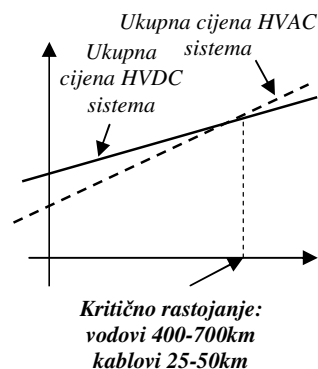
* Prof. dr Vladan Vujičić, Elektrotehnički fakultet Podgorica, Džordža Vašingtona b.b. 81000 Podgorica.

** Mr Martin Čalasan, Elektrotehnički fakultet Podgorica, Džordža Vašingtona b.b. 81000 Podgorica.

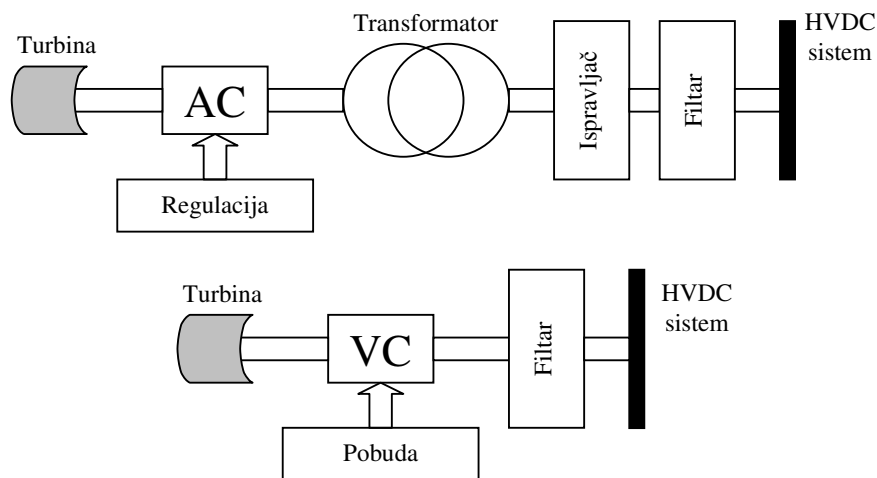
u [2] i [3]. Analiza uticaja šestopulsnog i dvanaestopulsnog ispravljača kod HVDC sistema na harmonijska izobličenja naizmjenične mreže razmatrana je u [4].



Slika 1. Najvažniji elementi HVDC sistema



Slika 2. HVAC i HVDC prenos energije



Slika 3. Klasični način proizvodnje električne energije i priključenje na HVDC sistem (gore); konekcija V-C generatora i HVDC sistema (dolje)

Troškovi priključenja *offshore* vjetroelektrane na HVDC sistem, manji su ako se direktno proizvodi jednosmjerni napon i struja, nasuprot konvencionalnoj generator-transformator-ispravljač kombinaciji [5]-[7], gdje se proizvode naizmjenični napon i struja, koja se zatim pomoću ispravljača pretvaraju u jednosmjerne veličine.

Na slici 3 je prikazan klasični način priključenja vjetroelektrane na HVDC sistem, sa naizmjeničnim generatorom, transformatorom i ispravljačkim sistemom, dok je na donjem dijelu slike prikazano priključenje V-C generatora na taj isti sistem.

U ovom radu je najprije objašnjen princip rada elektrostatičkog V-C generatora. Zatim je objašnjena principijelna šema njegove konekcije na HVDC sistem. Nakon toga, izvršena je analiza rada ovoga generatora u režimima praznog hoda i kratkog spoja. Rezultati simulacija za oba režima dobijeni su korišćenjem pojednostavljenih modela V-C generatora, kod kojih je kapacitivnost generatora sinusoidalna ili trougaona funkcija ugaonog položaja rotora.

2. V-C GENERATOR

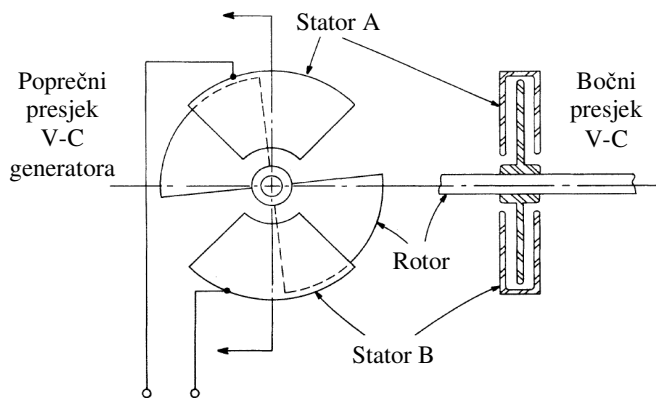
Sve konvencionalne mašine rade na principu elektromagnetske konverzije energije. Kod ovakvih mašina se, promjenom položaja rotora u odnosu na stator, mijenja induktivnost namotaja na statoru i namotaja na rotoru, kao i njihova međusobna induktivnost.

Međutim, moguće je konstruisati i elektrostatičku mašinu, kod koje je kapacitivnost između statora i rotora promjenjiva. Može se reći da postoji „dualnost“ između ova dva principa konverzije energije. Ono što za konvencionalne mašine predstavljaju induktivnosti i struje kroz namotaje, to za elektrostatičke mašine predstavljaju kapacitivnosti i naponi.

Na slici 4 je prikazana „floating rotor“ V-C mašina, kod koje se stator sastoji od dva dijela – stator A i stator B. Svaki od statora V-C generatora napravljen je od dva identična kružna isječka koji stoje jedan naspram drugog, dok se između njih nalazi prostor kroz koji prolazi rotor. Priključni krajevi ova dva dijela statora, priključuju se na prenosni vod. Kada je pozicija rotora takva da je on cjelokupno pokriven djelovima statora, tada je kapacitivnost između statora A i B maksimalna. Ova kapacitivnost predstavlja rednu vezu kapacitivnosti koje se javljaju između statora A i rotora, kao i statora B i rotora. Kako se rotor okreće i ova kapacitivnost se mijenja. Kada se rotor nalazi u takvoj poziciji da je najmanje pokriven djelovima statora, tada je kapacitivnost minimalna.

Na slici 4 prikazana je najprostija konfiguracija polova statora i rotora V-C mašine. U praksi je ova konfiguracija znatno komplikovanija [5].

Mašine čiji je rad zasnovan na elektromagnetskoj konverziji energije imaju potpuni primat u odnosu na elektrostatičke mašine. Ova činjenica je posledica fundamentalnog karaktera – gustina energije kod elektrostatičkih mašina je manja nego kod elektromagnetskih mašina. Na primjer, kod elektromagnetskih mašina moguće je u vazдушnom procjepu ostvariti magnetsku indukciju od 1.5T, što odgovara gustini energije od oko 900 kJ/m³. Za razliku od ove mašine, gustina energije kod V-C mašina je oko 1.8 kJ/m³, kada je jačina električnog polja 20 kV/mm. Prema tome, gustina energije je veća 500 puta kod elektromagnetskih mašina [5].



Slika 4. Poprečni presjek V-C generatora

Relativno mala gustina energije kod elektrostatičkih mašina, glavni je razlog što je do sada nedovoljno poklanjano pažnje razvoju V-C generatora. U [5] se razmatra mogućnost proizvodnje HVDC energije pomoću V-C mašina, pri čemu se preporučuje upotreba mašina koje razvijaju velike brzine i imaju veliki broj pari polova. Rezultati te analize, urađene još 70-ih godina prošlog vijeka, ukazuju da V-C mašine mogu biti konkurentne konvencionalnim mašinama, kada se sagleda cjelokupni generator-transformator-ispravljač sistem.

Kada je riječ o primjeni u HVDC sistemima, generalno postoje dvije važne komparativne prednosti elektrostatičkog generatora u odnosu na konvencionalne mašine, a to su:

- stepen iskorišćenja ovakvih mašina je veoma veliki (gubici u samoj mašini, uključujući i gubitke u diodama i elektronici manji su od 0.1%)
- pogodne su za rad sa veoma visokim naponima

2.1 ŠEMA KONEKCIJE V-C GENERATORA NA HVDC SISTEM

Imajući u vidu da je kapacitivnost V-C generatora promjenljiva, trenutna vrijednost struje generatora ne zavisi samo od izvoda njegovog napona, već i od izvoda kapacitivnosti, što se matematički može napisati kao:

$$i_c = \frac{d(C \cdot V_c)}{dt} = V_c \frac{dC}{dt} + C \frac{dV_c}{dt}, \quad (1)$$

gdje je $V_c = V_c(\theta)$ napon generatora, $C = C(\theta)$ kapacitivnost generatora, a θ - pozicija rotora. Na osnovu (1) može se napisati i izraz za trenutnu vrijednost snage :

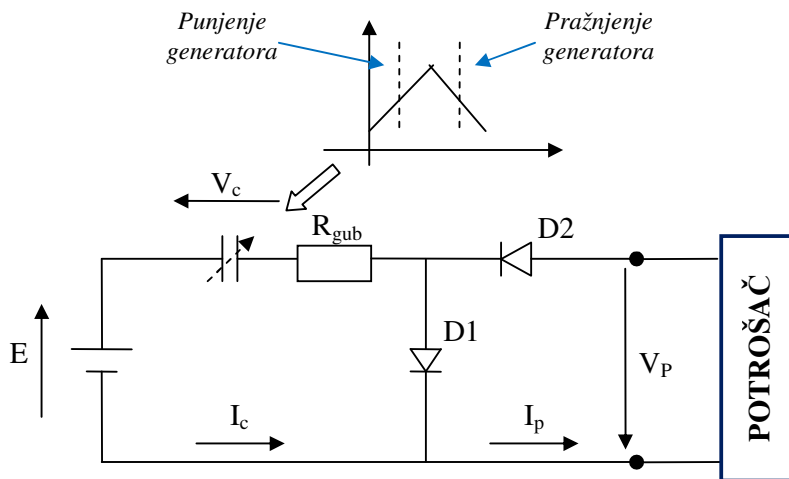
$$p = V_c^2 \cdot \frac{d(C)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + V_c \cdot C \cdot \frac{dV_c}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (2)$$

gdje prvi dio predstavlja konverziju elektrostatičke energije u mehaničku, a drugi dio predstavlja energiju apsorbiranu od strane generatora, pri čemu izvod $d\theta/dt$ predstavlja ugaonu brzinu rotora ($\omega_r=d\theta/dt$).

Jednačina (2) predstavlja glavni kriterijum za dizajn V-C generatora, a jasno je da je cilj postići:

- veliku vrijednost odnosa minimalne i maksimalne kapacitivnosti
- veliku vrijednost napona generatora
- veliku brzinu rotora

Na slici 5 prikazano je osnovno kolo za priključenje V-C generatora na HVDC sistem [5]-[7]. Da bi se inicijalizovala proizvodnja energije, potreban je neki nezavisni jednosmjerni naponski izvor koji obavlja funkciju pobude generatora. Preko dioda D1 i D2 vrši se punjenje (D1) odnosno pražnjenje (D2) generatora. U toku punjenja, pobudni naponski izvor predaje energiju V-C generatoru. Cjelokupnu primljenu količinu energije generator vraća naponskom izvoru, u toku ciklusa pražnjenja. Prilikom pražnjenja, generator takođe predaje energiju potrošaču, jer se tada strujna kontura zatvara kroz potrošač. Ta energija jednaka je razlici uložene mehaničke energije i gubitaka koji se javljaju u generatoru. Otpornost R_{gub} , prikazana na slici 5, služi za modelovanje gubitaka V-C generatora.



Slika 5. Zamjenska šema veze kapacitivnog generatora i potrošača

3. PRAZAN HOD V-C GENERATORA

Prazan hod (PH) predstavlja režim rada V-C generatora bez priključenog potrošača. U ovom režimu napon na krajevima potrošača dostiže teorijski maksimalnu moguću vrijednost.

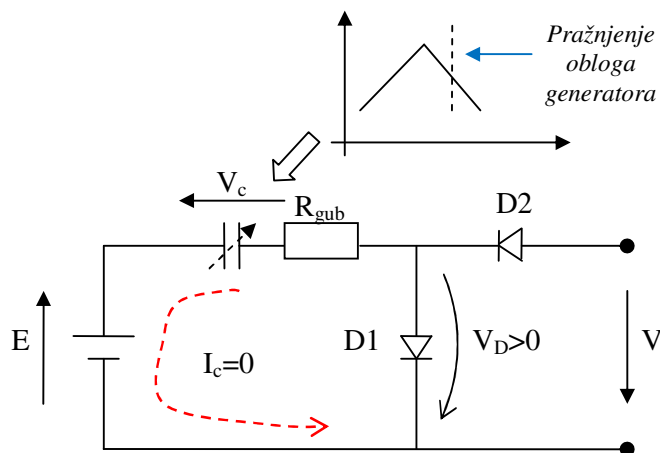
U režimu rada sa priključenim potrošačem, generator predaje energiju potrošaču u intervalima kada njegova kapacitivnost raste. Međutim, u režimu praznog hoda struja potrošača, a samim tim i struja generatora, u ovim intervalima jednaka je nuli (slika 6). Kada je rotor u položaju pri kojem je kapacitivnost maksimalna, napon V-C generatora jednak je naponu nezavisnog naponskog izvora tj. $V_c = E$. Pomjeranjem rotora iz tog položaja dolazi do povećanja napona V_c , jer se kapacitivnost generatora C smanjuje, a količina naelektrisanja ($Q = V_c \cdot C$) ostaje nepromijenjena. Na diodi D1 pojavljuje se inverzni napon $V_D = V_c - E$, koji je ujedno i izlazni napon ($V_x = V_D$). Na osnovu (1), uzimajući da je $i_c = 0$, dobija se sljedeći izraz za napon generatora:

$$V_c = \frac{K}{C(\theta)} = \frac{C_{\max}}{C(\theta)} \cdot E \quad (3)$$

Dakle, kako kapacitivnost generatora opada, napon na njegovim krajevima raste. Maksimalna vrijednost napona $V_{C_{\max}}$ generatora javlja se kada je kapacitivnost generatora minimalna ($C = C_{\min}$):

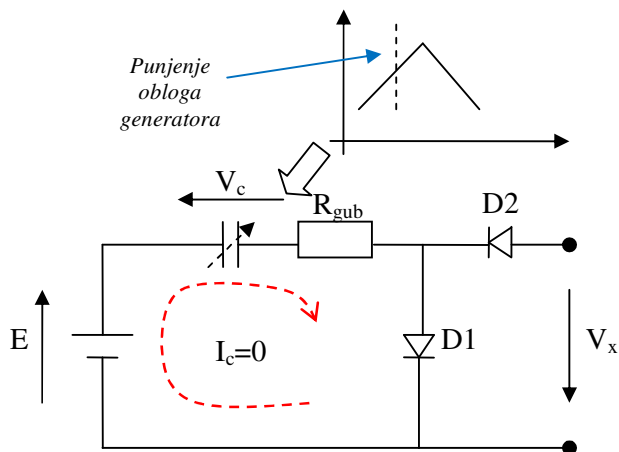
$$V_{c_{\max}} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \cdot E \quad (4)$$

Jednačina (4) pokazuje da je maksimalni mogući napon generatora proporcionalan naponu pobude i odnosu maksimalne i minimalne kapacitivnosti generatora.

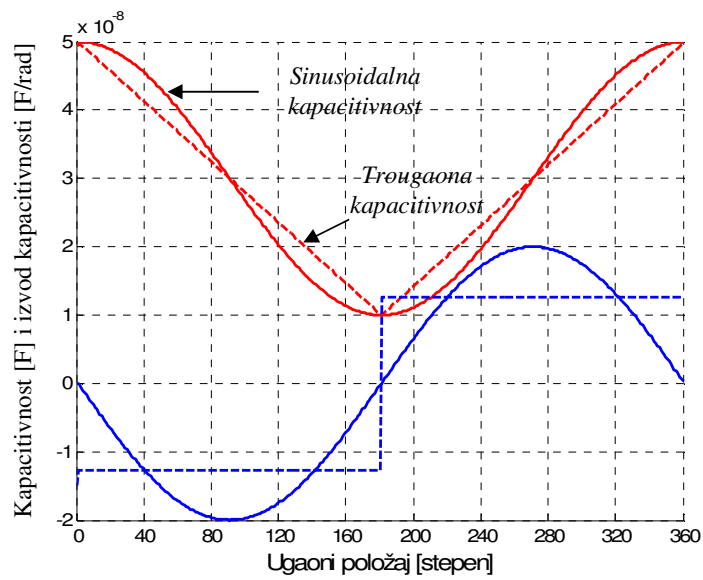


Slika 6. Zamjenska šema kapacitivnog generatora za režim pražnjenja u PH

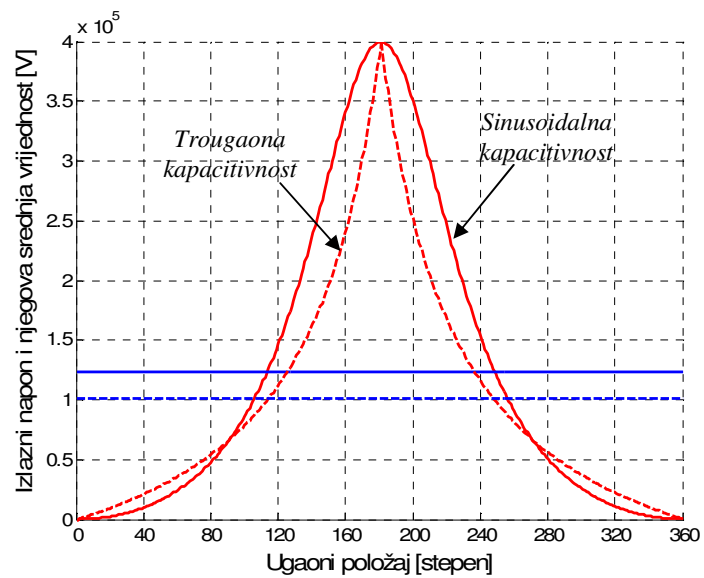
Nakon dostizanja svoje minimalne vrijednosti, kapacitivnost počinje da raste, pa generator prelazi u režim punjenja (slika 7). Međutim, napon na krajevima generatora je veći od napona pobude, pa je dioda $D1$ inverzno polarisana. Prema tome, i u režimu pražnjenja struja generatora jednaka je nuli, tako da i za ovaj režim rada važi jednačina (3). Pošto kapacitivnost kondenzatora raste, a količina naelektrisanja ostaje nepromijenjena, napon na krajevima generatora će da opada. Kada kapacitivnost postane maksimalna, napon generatora će ponovo biti jednak naponu pobude.



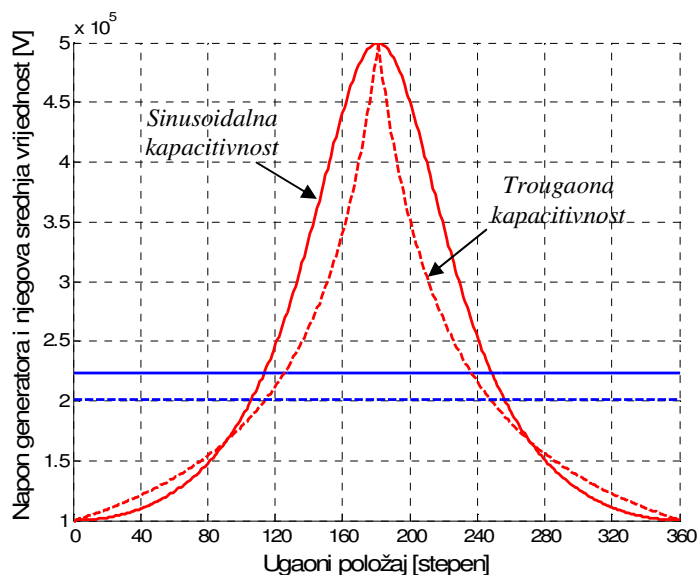
Slika 7. Zamjenska šema kapacitivnog generatora za režim punjenja u PH



Slika 8. Zavisnost kapacitivnosti generatora (C) i izvoda ($dC/d\theta$) od položaja rotora



Slika 9. Izlazni napon i njegova srednja vrijednost u režimu PH



Slika 10. Napon V-C generatora i njegova srednja vrijednost u režimu PH

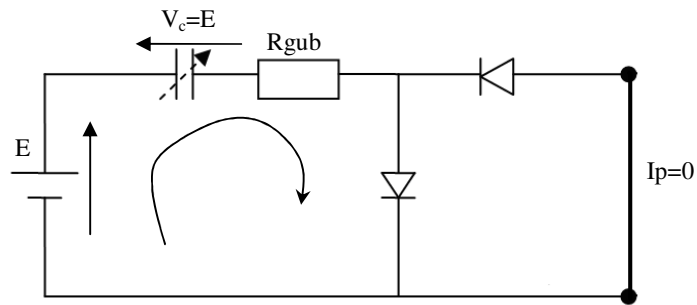
Na slici 8 prikazana su dva slučaja zavisnosti kapacitivnosti generatora od položaja rotora koje su korištene u računarskim simulacijama. U jednom slučaju pretpostavljena je sinusoidalna, a u drugom trougaona zavisnost. Na slici 8 prikazane su i odgovarajuće zavisnosti izvoda ($dC/d\theta$) pretpostavljenih kapacitivnosti. Izlazni napon ($V_x=V_D$) prikazan je na slici 9, dok je na slici 10 prikazan napon samog V-C generatora (V_c). Otpornost koja predstavlja gubitke je zanemarena. Podaci, na osnovu kojih se dobijaju navedeni rezultati, dati su u DODATKU, na kraju rada.

4. KRATAK SPOJ V-C GENERATORA

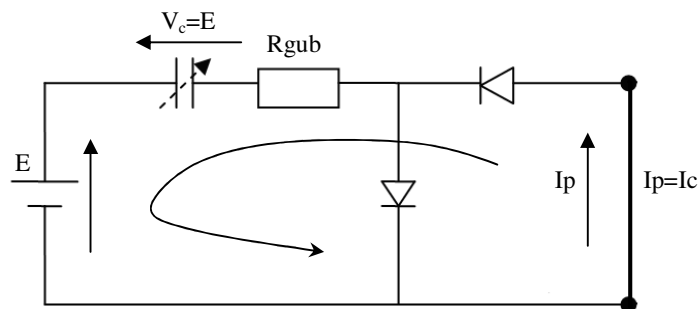
U režimu kratkog spoja (KS), krajevi potrošača su kratko spojen, tako da je izlazni napon jednak nuli. Na slikama 11 i 12 prikazane ekvivalentne šeme i označene aktivne strujne konture koje se odnose na intervale punjenja i pražnjenja generatora.

Ako se zanemare gubici u generatoru ($R_{gub}=0$), i ako su diode idealne, napon na krajevima generatora biće jednak naponu pobude ($V_c=E$). Tada se jednačina (1) svodi na (5):

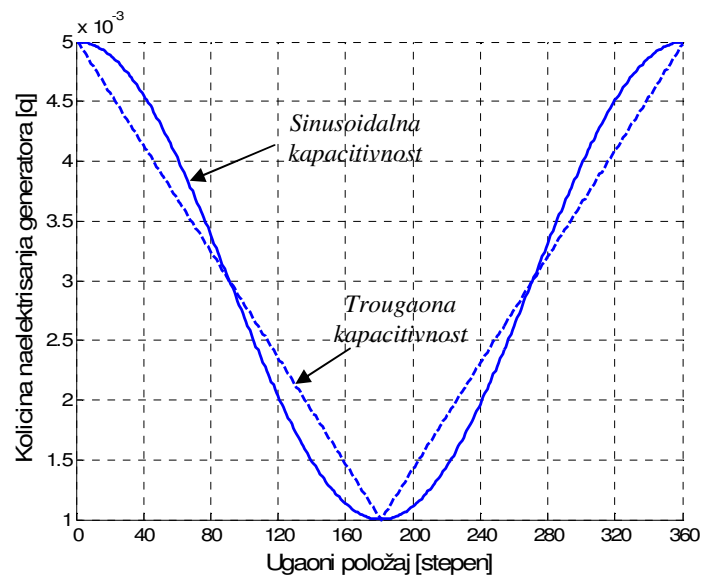
$$i_c = K \cdot \frac{dC(\theta)}{d\theta}, \quad K = \omega_c \cdot E \quad (5)$$



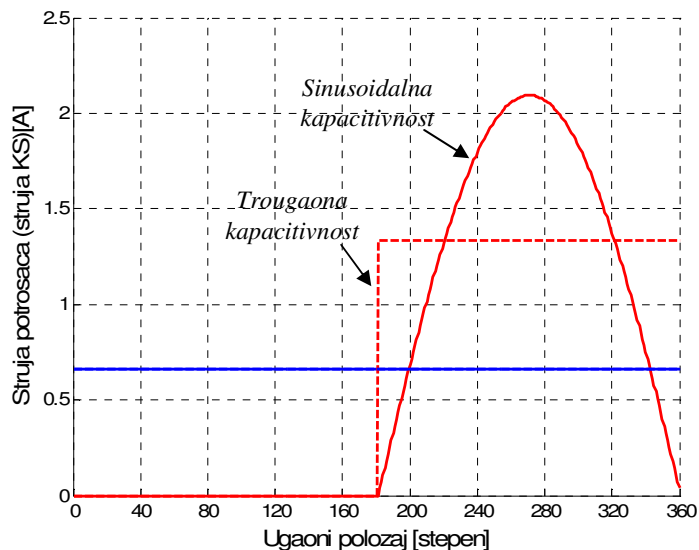
Slika 11. Zamjenska šema kapacitivnog generatora za režim punjenja u KS-u



Slika 12. Zamjenska šema kapacitivnog generatora za režim pražnjenja u KS-u



Slika 13. Količina naelektrisanja V-C generatora pri KS-u



Slika 14. Struja potrošača i njena srednja vrijednost pri KS-u

Jednačina (5) ukazuje da je struja generatora u KS režimu proporcionalna izvodu njegove kapacitivnosti. Kada kapacitivnost raste (interval punjenja) struja je pozitivna, a kada kapacitivnost opada (interval pražnjenja) struja je negativna. Srednja vrijednost struje generatora jednaka je nuli, pri čemu struja dostiže svoje maksimume u položajima kod kojih je brzina promjene kapacitivnosti najveća. U KS režimu dolazi do cirkulacije energije između pobudnog izvora i generatora. Količina naelektrisanja ($Q=CE$) i akumulirana energija u generatoru ($QE/2=CE^2/2$) direktno su srazmjerne kapacitivnosti generatora.

Na slici 13 prikazana je količina naelektrisanja razmatranog V-C generatora pri KS-u. Struja potrošača (struja kratkog spoja), prikazana je na slici 14.

5. ZNAČAJ ANALIZE RADA GENERATORA U PH-u i KS-u

Struja generatora u PH-u uvijek je jednaka nuli, pa je količina naelektrisanja Q na oblogama generatora konstantna. Na osnovu (3), količina naelektrisanja Q u PH-u iznosi:

$$Q = C(\theta) \cdot V_c = C(\theta) \cdot \frac{C_{\max}}{C(\theta)} \cdot E = C_{\max} \cdot E \quad (6)$$

Napon na krajevima generatora pri KS-u je uvijek konstantan i jednak naponu pobude, tako da važi sljedeća jednačina:

$$Q(\theta) = C(\theta) \cdot V_c = E \cdot C(\theta) \quad (7)$$

Na slici 15 prikazane su zavisnosti količine naelektrisanja Q od napona generatora V_c , dobijene na osnovu (6) i (7), koje važe za režime PH-a i KS-a. U režimu kratkog spoja, radna tačka pozicionirana je na duži AB i kreće se od tačke A do tačke B i, nazad, od tačke B do tačke A. Kada je kapacitivnost minimalna, radna tačka se poklapa sa tačkom A, a kada je kapacitivnost generatora maksimalna, radna tačka se poklapa sa tačkom B.

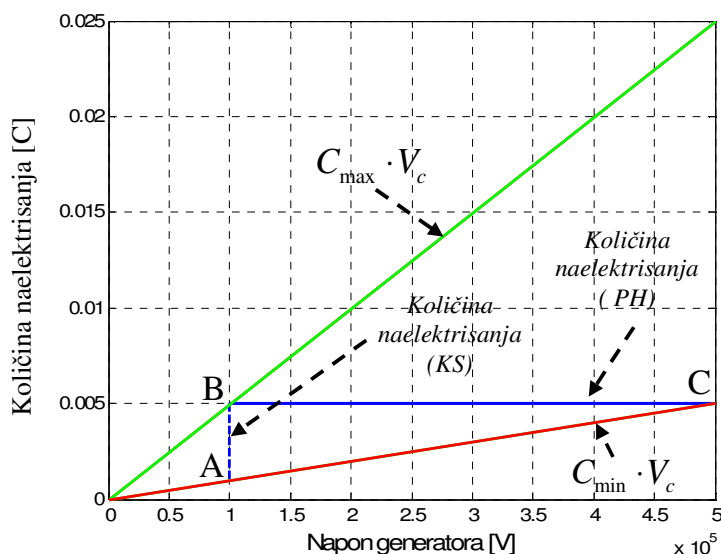
U režimu praznog hoda, radna tačka je uvijek unutar duži BC i kreće se od tačke B do tačke C i nazad. Za položaje rotora pri kojima je kapacitivnost maksimalna odnosno minimalna, radna tačka poklapa se sa tačkama B odnosno C, respektivno.

U normalnom režimu rada V-C generatora, kada je potrošač priključen, energija koja se predaje potrošaču u toku jednog ciklusa (periode kapacitivnosti C) jednaka je površini ostvarene $Q-V_c$ petlje. U režimima PH-a i KS-a ova površina jednaka je nuli. S druge strane, teorijski maksimalna energija koju je, u toku jednog ciklusa, moguće predati potrošaču jednaka je površini trogula ABC, označenog na slici 15. U tom slučaju, radna $Q-V_c$ tačka bi se prvo kretala od tačke A do tačke B, kada bi generator radio u KS-u. Zatim bi generator prelazio u režim PH-a, a radna tačka bi se kretala od tačke B do tačke C. Na kraju bi, u položaju koji odgovara minimalnoj kapacitivnosti generatora, radna tačka naglo prelazila iz tačke C u tačku A. Ovo dalje znači da bi svu energiju koju primi u toku jednog ciklusa, potrošač dobijao trenutno, što je u praksi nemoguće ostvariti. Dakle, u realnom slučaju, $Q-V_c$ petlja uvijek se zatvara unutar trougla ABC, pa je energija koja se predaje u jednom ciklusu potrošaču manja od njegove površine.

Ako energiju koja se predaje potrošaču u toku jednog ciklusa, odnosno površinu $Q-V_c$ petlje, označimo sa ΔW , onda snaga generatora P iznosi:

$$P = \frac{k \cdot n \cdot \Delta W}{60} \quad (8)$$

gdje je k – broj ciklusa u toku jednog obrtaja rotora i n – broj obrtaja rotora u minuti.



Slika 15. Količina naelektrisanja V-C generatora pri praznom hodu i pri kratkom spoju, u funkciji njegovog napona (V_c - napon V-C generatora)

Dakle, na osnovu oglada u režimima PH-a i KS-a, moguće je približno procijeniti snagu V-C generatora. Pored toga, na osnovu analize PH-a moguće je utvrditi teorijski maksimum napona generatora, a time i maksimum napona na potrošaču, dok se na osnovu analize KS-a može dobiti informacija o maksimalnoj struji generatora, odnosno potrošača. Tako, za testirani generator, uzimajući da je $k=1$, dobija se teorijski maksimalna snaga od 133KW, maksimalni napon generatora od 500KV i maksimalni napon na potrošaču od 400KV. Maksimalna struja V-C generatora, odnosno potrošača, u slučaju kada kapacitivnost ima trougaoni talasni oblik, iznosi 1.3A, dok je, u slučaju kada je talasni oblik kapacitivnosti sinusoidalan, maksimalna struja veća i iznosi 2.1A.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su navedeni razlozi zbog kojih se sve više razmišlja o upotrebi elektrostatičkog generatora kod proizvodnje električne energije iz energije vjetera. Osobine V-C generatora čine ga naročito atraktivnim za primjenu u sistemima vjetrogeneratora koji se priključuju na HVDC sistem, gdje bi se eliminisala upotreba skupih transformatora i konvertorskih stanica.

U radu su sprovedene analize rada V-C generatora u režimima praznog hoda i kratkog spoja, kroz koje je objašnjen i sam princip njegovog rada. Na osnovu ovakvih analiza, moguće je izvršiti procjenu snage, maksimalnog napona i maksimalne struje generatora.

Analiziranje rada V-C generatora u režimima praznog hoda i kratkog spoja od naročite je važnosti za proces projektovanja generatora i sistema njegove eksploatacije.

DODATAK

Parametri V-C generatora i podaci korišćeni u simulacijama:

$E=100\text{kV}$, $C_{max}=50\text{nF}$, $C_{min}=10\text{nF}$, $n=10000\text{ob/min}$

LITERATURA

- [1] N.G.Hingorani: „High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse,” *Spectrum IEEE*, vol.33, no.5, pp.63-72, April 1996.
- [2] 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.
- [3] Michael P. Bahrman: “Overview of HVDC Transmission,” *Power Systems Conference and Exposition*, PSCE'06, pp. 18-23, Oct. 2006.
- [4] M. Čalasan, V. Vujičić: “Analiza uticaja šestopulsnog i dvanaestopulsnog ispravljača kod HVDC sistema na harmonijska izobličenja naizmjenične mreže”, *Informacione tehnologije*, Žabljak, 2010.
- [5] S. F. Philp: “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. Cullen: “The Variable-Capacitance Machine for Off-shore Wind Generation” in *Proc. 6th 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.