

**MODEL I SIMULACIJE VETROGENERATORA U ATP/EMTP-U I
MATLAB/SIMULINK-U ZA SLUČAJ ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA****MODEL AND SIMULATIONS OF WIND TURBINE IN ATP/EMTP AND
MATLAB/SIMULINK IN CASE OF ATMOSPHERIC DISCHARGE**Milana Komisar¹, Michael Rock², Vladimir Katić³;^{1,3}Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija; ²Tehnički Univerzitet Ilmenau, Ilmenau, Nemačka**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je razmatran uticaj atmosferskog pražnjenja na vetrogenerator. Modelovan je sistem vetrogeneratora u dva različita softverska alata, u ATP/EMTP-u i Matlab/Simulink-u. Posmatrani su i upoređeni rezultati napona i struje u sistemu prilikom udarne struje.

Ključne reči: Atmosfersko pražnjenje, Vetrogenerator, ATP/EMTP, Matlab/Simulink

Abstract - In this paper, the impact of atmospheric discharge on a wind turbine is presented. Wind turbine is modelled using two different software tools ATP/EMTP and Matlab/Simulink. The current and voltage distribution during lightning impulse current strikes are observed and results are compared.

Keywords: Atmospheric Discharge, Wind Turbine, ATP/EMTP, Matlab/Simulink

1. UVOD

U svetu, a i kod nas, sve je veća zastupljenost distribuiranih elektroenergetskih izvora baziranih na obnovljivim izvorima energije. U tu grupu ubrajaju se i vetrogeneratori, čiji kapaciteti se ubrzano povećavaju, tako da danas predstavljaju najznačajnije ovakve elektrane. Kao objekti specifične konstrukcije, sa veoma visokim stubom (tornjem) i dugačkim oštricama lopatica vetrogeneratora (rotora), kao i zbog njihovih karakterističnih lokacija, vetrogeneratori su pogodna meta udara atmosferskih pražnjenja.

U radu su razmatrani efekti, koji se javljaju pri udarnim strujama na elementima vetrogeneratorskog sistema i pojave prenapona na određenim elementima, kroz modelovanje i simulacije korišćenjem dva poznata softverska alata ATP/EMTP i Matlab/Simulink. Dobijeni rezultati su upoređeni i komentarisani.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada, koji je rađen na Tehničkom Univerzitetu u Ilmenau (Nemačka) u sklopu studentske razmene (Projekat Erasmus+) i čiji supervizor je bio prof. dr Michael Rock, a odbranjen na FTN u Novom Sadu, pod mentorstvom prof. dr Vladimira A. Katića.

2. ATMOSFERSKO PRAŽNJENJE

Atmosfersko pražnjenje je vremenski fenomen povezan sa masivnim električnim pražnjenjem u nižim slojevima atmosfere, pri površini zemlje koji je praćen zvučnim i svetlosnim efektom, tj. grmljavinom i bljeskom (munjom). Između 2000 and 3000 atmosferskih pražnjenja je konstantno aktivno širom sveta, oko 30 do 120 po sekundi. Pojavljuju se udarne struje amplitude preko 200 kA, koje mogu prouzrokovati značajne posledice na ljude, objekte i tehničku opremu [1].

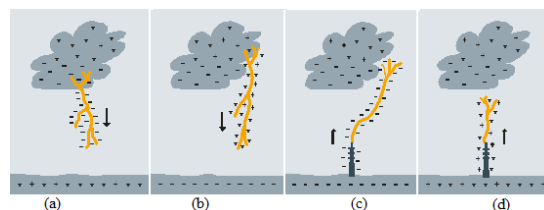
Atmosfersko pražnjenje je suštinski električni proboj vazduha. Javlja se kada jačina električnog polja između oblaka i zemlje premaši električnu čvrstoću vazduha, tj. 3 MV/m [2].

2.1. Vrste atmosferskog pražnjenja

Postoje tri osnovne vrste atmosferskog pražnjenja, u skladu sa tim šta se nalazi na krajevima kanala koji se manifestuje tom prilikom. Tako postoje atmosferska pražnjenja, koja se javljaju:

- 1) unutar oblaka,
- 2) između dva različita oblaka i
- 3) između oblaka i zemlje.

Dalja podela atmosferskog pražnjenja između oblaka i zemlje jeste prema smeru inicirajućeg naelektrisanja i prema vrsti naelektrisanja koja se sprovodi od oblaka ka zemlji. Mogu se pojaviti lideri na više (od zemlje ka oblaku) i na niže (od oblaka ka zemlji), i oba mogu biti pozitivne ili negativne prirode. Na slici 1 predstavljeni su tipovi atmosferskog pražnjenja između oblaka i zemlje na osnovu smera i naelektrisanja.



Slika 1. Tipovi atmosferskog pražnjenja između oblaka i zemlje na osnovu smera i naelektrisanja

2.2. Tipičan oblik strujnog talasa prouzrokovanog atmosferskim pražnjenjem

U praksi se najčešće koristi Heidlerov model udarne struje [3]. Ovaj model je značajan jer najverodostojnije opisuje

oblik talasa koji se javlja pri atmosferskom pražnjenju. Opisuje se sledećom matematičkom jednačinom:

$$i = \frac{i_{max}}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^{10}} * e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ za } t \geq 0 \quad (1)$$

gde je i_{max} – vršna vrednost struje u A; η – korekcionni faktor temene vrednosti struje; t – vreme u s; T – vremenska konstanta čela u s; τ – vremenska konstanta začelja u s.

Tabela 1. Parametri za analitičko predstavljanje udarne struje [4]

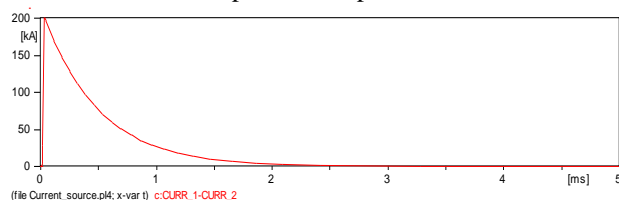
Parametri	Talasni oblik T_1/T_2		
	Prvi pozitivan udar 10/350 μ s	Prvi negativan udar 1/200 μ s	Negativan povratni udar 0,25/100 μ s
η	0,930	0,986	0,993
T	19 μ s	1,82 μ s	0,454 μ s
τ	485 μ s	285 μ s	143 μ s

2.3. Uticaj atmosferskog pražnjenja na vetrogenerator

Vetrogenerator, kao objekat značajne visine (u ovom radu je pretpostavljena visina od 100 m) i na specifično pogodnim pozicijama za iskorišćenje energije vetra je na meti atmosferskog pražnjenja. Oštrice lopatice rotora imaju receptore koji reaguju kao „hvatači“ prilikom udara munje i sprovode strujni impuls kroz provodnike koji su ugrađeni unutar elisa do delova u gondoli koji su dalje povezani sa sistemom uzemljenja, izjednačavanja potencijala i zaštite. Obično su kritične tačke za udar pri vrhu oštrice rotora, iako nisu isključene mogućnosti spoja strujnog kanala sa ostalim delovima sistema. Značajna je energetska vrednost koju nosi udarni impuls i koja može da prouzrokuje ozbiljne posledice termičke i mehaničke prirode.

2.4. Tip atmosferskog pražnjenja korišćen u simulacijama

U ovom radu se koristi prvi visokoenergetski impuls udarne struje, talasnog oblika 10/350 μ s, sa vršnom vrednošću struje do 200 kA (slika 2). Talasni oblik udarne struje pojednostavljen je u svrhu simulacija. Koristi se samo prvi talasni oblik impulsnog udara definisan Heidlerovom formulom i prethodno spomenutim vrednostima.



Slika 2. Talasni oblik impulsne struje groma

3. DELOVI VETROGENERATORA

Osnovni razmatrani delovi vetrogeneratora su: oštrice lopatica rotora, NN generator, konvertor, toranj sa energetskim kablovima unutra, NN-SN transformator, uzemljenje sistema i SN mreža kao spojnica za povezivanje na distributivnu mrežu napona 20 kV. Ovi sklopovi su modelovani i testirani pomoću simulacija najpre zasebno u kolu sa strujnim izvorom, a zatim u kratkom spoju.

4. SOFTVERSKI ALATI ZA MODELOVANJE

Modelovanje je proces u kojem korisnik opisuje dinamički sistem matematičkim jednačinama, a zatim kreira pojednostavljeni prikaz sistema s modelom. Jednačine definišu ponašanje sistemu.

4.1. ATP/EMTP

EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) je primarni simulacioni program koji se koristi u elektroenergetici, dok je ATP (*Alternative Transients Program*) verzija ovog softverskog alata.

Zajedno, ATM/EMTP se veoma često koriste kao univerzalni programski sistem za digitalne simulacije prelaznih procesa elektromagnetske i elektromehaničke prirode u EES-u [5].

4.2. Matlab/Simulink

Simulink je okruženje blok dijagrama za simulaciju više domena i dizajniranju modela različitih elemenata sistema. Podržava dizajn, simulaciju, automatsko generisanje koda na nivou sistema i kontinuirano testiranje i verifikaciju ugrađenih sistema.

Simulink nudi grafički editor, prilagodljive blok biblioteke i rešenja za modelovanje i simulaciju dinamičkih sistema [6].

5. MODEL VETROGENERATORA ZA VREME ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA U ATP/EMTP

Na slici 3 prikazan je celokupan model vetrogeneratora koji je izveden u ATP/EMTP softverskom alatu. Integrisani su svi osnovni električni delovi sistema zajedno sa izvorom udarne struje, koju predstavlja Heidlerova funkcija.

Merni instrumenti su postavljeni za posmatranje distribucije struja i napona koji se pojavljuju na značajnim mestima. Od interesa su vrednosti napona i struja na generatoru, transformatoru i energetskim kablovima, prvenstveno radi njihove zaštite.

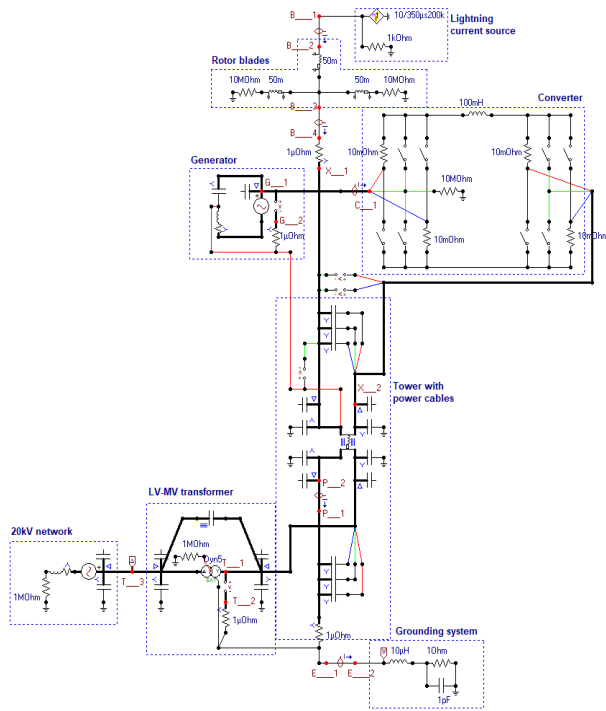
6. MODEL VETROGENERATORA ZA VREME ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA U SIMULINK

Kao u ATP/EMTP i u Matlab/Simulink-u modelovan je ceo sistem vetrogeneratora sa istim električnim delovima i izvorom udarne struje (slika 4).

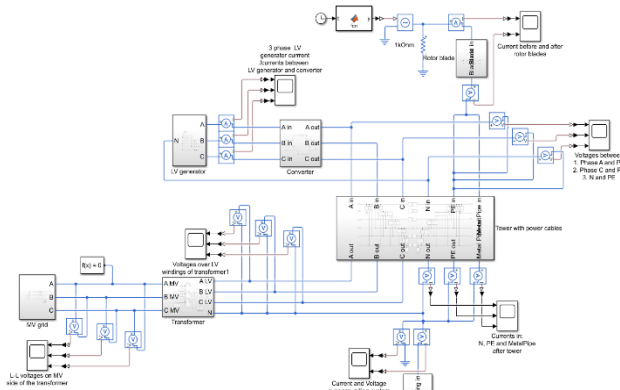
Prilikom modelovanja elemenata, korišćene su iste vrednosti parametara modela i iste šeme. Iz tog razloga su i korišćeni jednostavniji modeli elemenata, da bi se oni što verodostojnije mogli replikovati u oba softverska okruženja.

7. REZULTATI SIMULACIJA

Simulacije u oba program su izvršene za vreme od 5 ms. Linijski elementi odnosno, oštrice rotora i toranj sa kablovima su prvo modelovani kao distribuirani elementi. Rezultati su pokazali da nema vidljivih efekata refleksije putujućeg talasa, jer je vreme čela impulsnog udara veće od vremene putujućeg talasa. Na primeru rotorske oštrice vreme putujućeg talasa izračunato je kao:



Slika 3. Model vetrogeneratora tokom udara groma u ATP-u



Slika 4. Model vetrogeneratora tokom udara groma u Simulink-u

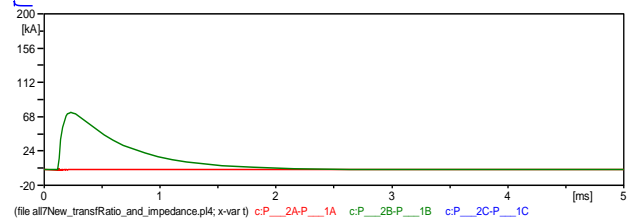
$$T = \frac{l}{c} = \frac{50 \text{ m}}{300 \text{ m}/\mu\text{s}} = 0.167 \mu\text{s} \quad (2)$$

7.1. Rezultati raspodele struja i prenapona

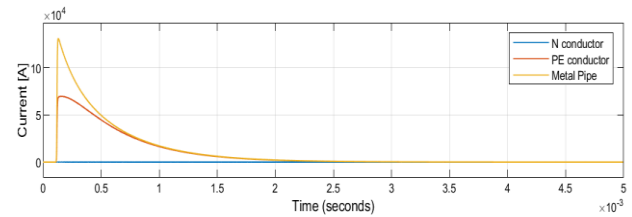
Rezultati koji su dobijeni poređenjem celokupnih modela vetrogeneratora u ATP/EMTP i Simulink-u pokazuju pre svega, iste vrednosti struja i napona u stacionarnom stanju (normalan, operativni rad sistema). Približno ista raspodela struja je rezultat u oba modela.

Međutim, na slikama 5 i 6 je vidljivo da struja merena u podnožju tornja ima blage promene. Uočljiv je pomeraj talasnog oblika struje PE provodnika. Maksimum struje u ovom provodniku u Simulink modelu javlja se nešto ranije (crvena linija na slici 6) nego u ATP-u (zeleno linija na slici 5) i sa nešto većom maksimalnom vrednošću. Zbog toga je struja izmerena u metalnom tornju u Simulink modelu manja (žuta linija na slici 6 i plava na slici 5). Po Kirhofovom zakonu, na mestu čvorišta struja atmosferskog pražnjenja ulazi u čvor, a struje u N, PE provodnicima i metalnom tornju izlaze iz čvora i sumarno daju zbir od 200 kA, u oba slučaja.

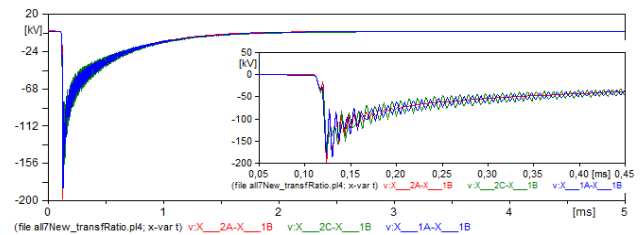
Slike 7 i 8 pokazuju rezultat merenih napona na vrhu tornja između PE provodnika i faza A, C i N, respektivno. Posledično, kako su se pojavile razlike u strujama u ova dva modela, tu su razlike i u naponima. U Simulink-u se pojavljuje znatno veća vršna vrednost izmerenih napona (-1,4 MV), nego u ATP-u (-0,2 MV).



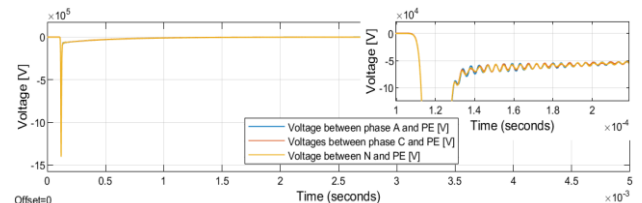
Slika 5. Talasni oblik struja u N, PE provodniku i u metalnoj cevi na dnu tornja u ATP-u



Slika 6. Talasni oblik struja u N, PE provodniku i u metalnoj cevi na dnu tornja u Simulink-u



Slika 7. Napon između PE provodnika i faza A, C i N respektivno u ATP-u



Slika 8. Napon između PE provodnika i faza A, C i N respektivno u Simulink-u

Nastala pojava može da se objasni sledećim izrazom:

$$e_{21}(t) = L_{11} \frac{di_2(t)}{dt} + M_{21} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (3)$$

odnosno indukovanjem napona na induktivnosti i međuinduktivnosti provodnog puta.

Ovde je bitno naglasiti da je jedina, značajna razlika u modelima napravljena pri modelovanju tornja kod kablova. U ATP/EMTP toranj sa kablovima je modelovan sa sopstvenim induktivnostima, kapacitivnostima i otpornostima, isto kao što su u modelu uvažene i međusobne induktivnosti i kapacitivnosti. Dok u modelu tornja sa kablovima u Simulinku nisu uvažene međusobne induktivnosti. Razlog tome je nepostojanje već gotovog bloka koji bi uvažio međusobnu induktivnu spregu 6 linijskih provodnika, dok je u EMTP/ATP takav element za modelovanje dostupan.

Sumarno, osnovne razlike u rezultatima ATP i Simulink modela su u opsegu oscilacija i vršnim vrednostima koje se pojavljuju u vreme prednjeg dela (začelja) impulsnog strujnog uzvora (uvećani detalji na slikama 7 i 8).

7.2. Ograničenja i razlike između ATP i Simulink modela

Osnovna razlika između modela u ATP/EMTP i Matlab-/Simulink softverskim alatima jeste izostavljanje induktivne sprege u modelu tornja sa energetske kablovima. Nakon testiranja zasebnih modela tornja sa energetske kablovima u ova dva, različita softvera, dobijeni rezultati nisu sa značajnim ili velikim razlikama.

Međutim, razlike su se pojavile u kompletnom modelu, većinom u delu talasnih oblika koji odgovaraju vremenu prednjeg dela impulsne krive strujnog izvora. Ti rezultati dovode do zaključka da izostavljanje i zanemarivanje induktivne sprege (odnosno među-induktivnosti) igra značajnu ulogu u odzivu celog sistema. Tokom prelaznih procesa, izražen je veliki uticaj struje u jednom provodniku na druge provodnike koji su u induktivnoj sprezi. A po svojoj prirodi, svi elementi u tornju su induktivno spregnuti. Posebice struju atmosferskog pražnjenja karakteriše velika strmina (odn. impuls) na početku, koji zapravo znači veliku vrednost derivacije struje po vremenu. Taj činilac je vrlo bitan i ističe i doprinosi uticaju među-induktivnosti u kolu. Tako da, u konkretnom slučaju, među-induktivnost ima značajnu ulogu u rezultujućim raspodelama struja i prenapona koji se pojavljuju u kolu.

7.3. Prednosti i nedostaci uprošćenog modelovanja

Svi delovi vetrogeneratora su modelovani uprošćeno, zbog usmerenosti ka posmatranju celokupnog modela i posmatranju željene rapodele bitnih veličina u celom modelu. Stoga, pojavile su se određene prednosti i nedostaci ovakvog pristupa. Neke od prednosti su: razumevanje modela i celokupne mreže kao i relativno lako primenjivanje prolaznih procesa; modeli se lako mogu prilagoditi različitim vrstama vetroturbina; relativno jednostavno prikupljanje podataka potrebnih za parametrizaciju modela; jednostavno manevrisanje modelima i ako je potrebno, jednostavna promena modela; moguća je uglavnom stabilna simulacija; moguće je posmatrati različite odzive u skladu sa promenom parametara; lako upoznavanje inženjera sa upotrebom modela ili celokupne simulacijske mreže.

U drugu ruku, sa pojednostavljenim modelovanjem, pojedini efekti nisu simulirani u potpunosti. Neki od njih su od većeg, neki od manjeg značaja kao što dobijeni rezultati pokazuju. Na primer, izostavljena induktivna sprega kablova je izazvala značajne posledice i promene u odzivu sistema. Karakteristična impedansa rotorske elise je računata na osnovu formule za izračunavanje impedanse provodne niti paralelne provodnoj površini iako je položaj u kome se injektira strujni impuls okomit na zemljinu površinu. Isto tako, karakteristična impedansa tornja (i kablova unutar) nije zavisna od visine, iako kapacitivnost sa visinom opada, a induktivnost raste.

Naposletku, posmatrani su samo električni delovi vetrogeneratora kao sistema. Nisu uzimani u obzir i razmatrani mehanički delovi sistema, niti bilo kakav vid konverzije mehaničke energije vetra u električnu energiju koju generiše generator.

8. ZAKLJUČAK

Rezultati rada pokazuju mogućnost modelovanja istih elemenata u Matlab/Simulink-u kao i u ATP/ETP-u, za specifičan slučaj vetrogeneratora tokom atmosferskog pražnjenja. Mogućnost zamene pojedinačnih delova modela, i na kraju celokupnog modela obezbeđuju mogućnost korišćenja softverskog alata Simulink za analizu sistema u kojima su od značaja tranzijentni procesi. Moguće ih je kombinovati i sa implementacijom drugih delova različitih sistema, kakvi su široko primenjivani u softverskom okruženju Simulink.

Kao bitan rezultat ističe se značaj i uticaj induktivne sprege u modelu. Prilikom izostavljanja međusobne induktivnosti tokom modelovanja dolazi do značajnijih promena, koje se ne bi smele zanemarivati.

9. LITERATURA

- [1] A. V. Rakov and A. M. Uman, "Lightning. Physics and effects", United Kingdom, Cambridge University Press, 2003.
- [2] H. Weifei, "Advanced Wind Turbine Technology", New York: Springer, 2018.
- [3] P. Hasse, J. Wiesinger and W. Zischank, "Handbuch für Blitzschutz und Erdung", Berlin, 2006.
- [4] F. Heidler, "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung", 18th ICLP Intern. Conf. on Lightning Protection, Munich, 1985.
- [5] H. K. H. LászlóPrikler, "ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista, Users' Manual", ATPDraw version 5.6, 2009.
- [6] "The MathWorks, Simulink® Getting Started Guide" United States, 2016.

Kratka biografija:



Milana Komosar rođena je u Prijedoru, Bosna i Hercegovina, 1994. god. Osnovne studije završila je na Fakultetu tehničkih nauka (FTN) iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi 2018. god. Master studije, takođe na FTN na modulu Distribuirani elektroenergetski resursi završila je 2019. god. uz proveden jedan semestar na TU Ilmenau (Nemačka).



Michael Rock rođen je 1971. god. Studirao je elektrotehniku na TU Ilmenau gde je diplomirao 1996. god., odnosno doktorirao 2001. god. Pre izbora u zvanje profesora na TU Ilmenau, radio je od 2009. do 2011. god. kao inženjer na projektu u kompaniji Dehn + Sohne.



Vladimir Katić rođen je 1954. god. u Novom Sadu. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. god. Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasni interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori energije, električna vozila i kvalitet električne energije.