

Viktor Milardić
Ivo Uglešić
Boško Milešević
viktor.milardic@fer.hr
ivo.uglesic@fer.hr
bosko.milesevic@fer.hr
FER, Zavod za visoki napon i energetiku, Zagreb

Luciano Delbianco
luciano.delbianco@politehnika-pula.hr
Politehnika, Pula

PRENAPONSKA ZAŠTITA GENERATORA IZRAVNO SPOJENIH NA SN MREŽU

SAŽETAK

U radu su prikazani rezultati studije prenaponske zaštite generatora u maloj hidroelektrani koji je izravno povezan s nadzemnom SN mrežom. SN vodovi prolaze područjem visoke izokerauničke razine te visokog specifičnog otpora tla. Udarom munje u SN nadzemni vod nastaju prenaponi koji mogu oštetiti izolaciju statorskog namota generatora. Parametri za model generatora su dobiveni proračunom i mjerenjem. U radu je prikazan model za simulaciju te dati rezultati simulacije. Poboljšanje prenaponske zaštite se postiže instalacijom dodatnih odvodnika prenapona spojenih na priključnice generator i u zvjezdište. Uzemljenjem nosača izolatora na prva tri drvena stupa SN mreže, nastankom preskoka, smanjuje se amplituda prenapona koji stižu dalekovodom.

Preporuka je provesti analizu prenaponske zaštite za svaki generator koji se projektira za izravno povezivanje na nadzemnu SN mrežu.

Ključne riječi: generator, prenaponska zaštita, proračuni, mjerenja, EMTP simulacije

SURGE PROTECTION OF GENERATORS DIRECTLY CONNECTED TO A MEDIUM VOLTAGE NETWORK

SUMMARY

The paper presents the results of the surge protection study of a generator in a small hydro power plant that is directly connected to the overhead network. Medium voltage overhead lines pass through to the area of high isoceraunic activity with high specific resistance of soil. Lightning striking overhead lines produce voltage transients that can harm insulation of a generator stator winding. The parameters for the generator model were obtained by calculation and measurement. The simulation model is presented, and results of the simulations are given. The improvement of surge protection is achieved by installation of additional surge arresters connected to generator terminals and at neutral point. Grounding of insulator supports on the first three wooden poles of MV network, flashovers can occurred and amplitude of incoming surges waves are decreased.

It is recommended to conduct surge protection analysis for each generator which is designed to be directly connected to the overhead line.

Key words: Generator, Surge Protection, Calculation, Measurement, EMTP Simulation

1. UVOD

Obnovljivi izvori energije su sve važniji u proizvodnji električne energije u suvremenom svijetu. U obnovljive izvore energije se ubrajaju i male hidroelektrane (MHE) te se njihov broj u svijetu povećava. Nažalost, u RH taj investicijski ciklus ne postoji kao u nekim susjednim zemljama.

Generatori u hidroelektrani (HE) su najvažniji i najskuplji elementi te njihovoj zaštiti treba posvetiti posebnu pažnju. Kvar generatora iziskuje velika financijska sredstva za popravak, no više od toga financijski gubitak nastaje dugotrajnim zastojem u proizvodnje električne energije. Naime, većina kvarova generatora se ne mogu popraviti u hidroelektrani što nadalje zahtjeva složeni postupak demontaže generatora, transporta u radionicu, popravak u radionici, transport do hidroelektrane te složeni postupak montaže i puštanja u rad.

Iskustva pokazuju da kvarovi u MHE nastupaju češći nego u velikim HE, zbog jednostavnije priključne sheme, a često i nedostatka zaštitnih mjera kakve se primjenjuju u velikim HE.

Prenaponska zaštita generatora se postiže principom koordinacije izolacije, koji obuhvaća izbor i primjenu dielektrične čvrstoće izolacije, ovisno o naponima i prenaponima koji se mogu pojaviti u mreži za koju je generator namijenjen, uzimajući u obzir karakteristike raspoloživih zaštitnih uređaja. Svrha koordinacije izolacije je svođenje vjerojatnosti oštećenja izolacije generatora ili prekida rada, prouzrokovanih prenaponskim naprezanjima na ekonomski i pogonski prihvatljivu vrijednost [1], [2].

U radu je prikazana analiza atmosferskih prenapona koji mogu ugroziti izolacijski sustav generatora i predložene mjere za poboljšanu prenaponsku zaštitu.

2 GENERATOR DIREKTNO SPOJEN NA SN NADZEMNU MREŽU

Poznato je da blok transformatori kao i energetske transformatori doprinose prenaponskoj zaštiti, prvenstveno stoga što su sami štice odvodnicima prenapona, a i zbog prigušenja prenaponskog vala prilikom prolaska s jednog namota transformatora na drugi.

Neke MHE su izravno spojene na SN nadzemnu mrežu i njihovi generatori su izloženi prenaponima, nego generatori spojeni na mrežu preko blok transformatora i spojnih kabela ili oklopljenih sabirnica, koje mogu biti duge nekoliko stotina metara, [3].

Kada strmi atmosferski prenaponi stignu do priključnica generatora, veći dio prenapona se prvotno raspodijeli na nekoliko prvih zavoja prvog svitka statorskog namota generatora, što može oštetiti izolaciju među zavojima ili prema zemlji, [4], [5]. Prelaskom prenaponskog vala duž statorskog namota njegova strmina i amplituda se smanjuju.

DV u SN 10 kV mreži su često na armirano-betonskim, odnosno drvenim stupovima bez zaštitnog užeta, što je također nepovoljna konfiguracija sa stajališta prenaponske zaštite. Naime, struje munje svih amplituda mogu izravno pogoditi fazni vodič, što je izuzetno nezgodan događaj za generatore, naročito ako se radi o bliskom udaru munje. Također, inducirani naponi mogu biti većih amplituda jer nema uzemljenog zaštitnog užeta koje ostvaruje određeno prigušenje (redukciju) [6].

SN 10 kV mreža na koju je priključena MHE je u pogonu s izoliranim zvjezdištem. U takvim mrežama, pri zemljospoju dolazi do znatnog porasta napona zdravih faza [7]. Također, intermitirani zemljospojevi mogu prouzročiti dugotrajne prenapone znatne amplitude. U mrežama s izoliranim zvjezdištem su također moguće i druge rezonantne pojave.

Sve navedeno otežava izvedbu kvalitetne prenaponske zaštite generatora.

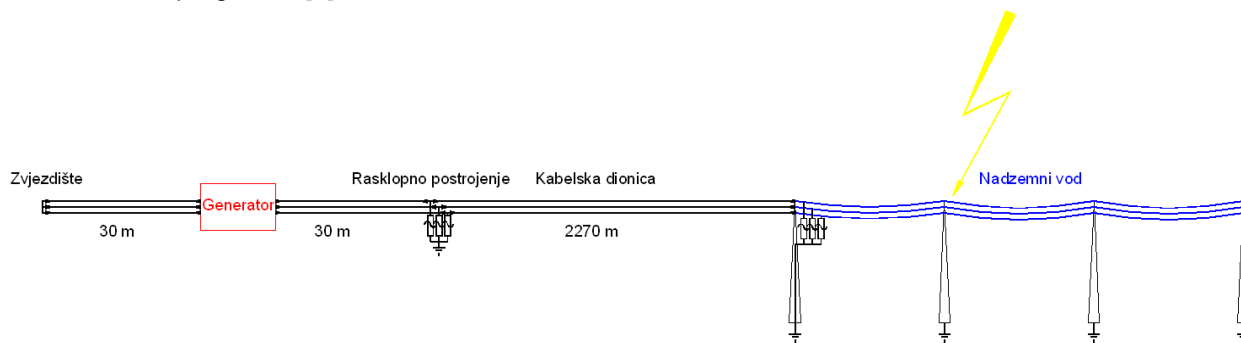
3 MODEL ZA SIMULACIJU PRENAPONA

Na slici 1. je shematski prikaz nadzemnog voda, kabelske dionice i generatora za razmatranje prijelaznih pojava. Dionica dvosustavnog nadzemnog voda 10(20) kV na slici 1. je na betonskim stupovima s metalnim konzolama. Metalne konzole su povezane preko armature stupa s uzemljivačem stupa. Vod nema zaštitno uže pa udari munje svih amplituda mogu izravno pogoditi fazne vodiče. Pri udaru munje u fazni vodič dolazi do značajnog povišenja napona vodiča (nastaje prenapon) uslijed utisnute struje munje. Prenapon će, u najvećem broju slučajeva, izazvati preskok preko izolatora na konzolu stupa odnosno na uzemljene dijelove.

Udar munje može biti i u blizini trase voda ili između oblaka. U tom slučaju se na vodu induciraju prenaponi.

Prenaponi, bez obzira na uzrok, putuju vodom na obje strane, a prenaponski val preko kabelske dionice stiže do rasklopnog postrojenja u MHE i do generatora, slika 1. Pri dolasku vala do spoja nadzemni vod – kabel ili kabel – generator dolazi do višestrukih refleksija. Instalirani odvodnici prenapona također odvode

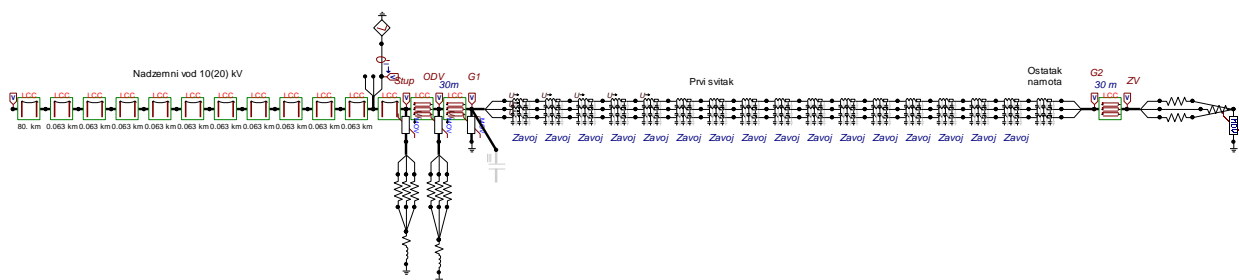
dio energije prenaponskog vala. Za razmatranje ove izuzetno složene prijelazne pojave koristit će se ATP inačica EMTP programa, [8].



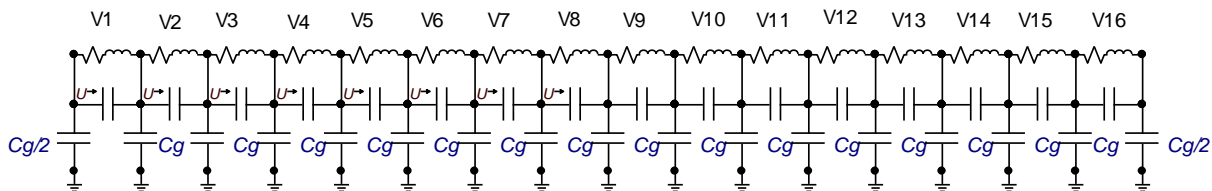
Slika 1. Shematski prikaz nadzemnog voda, kableske dionice i generatora za razmatranje prijelaznih pojava

3.1. Detalji ATP modela

Na slici 2. prikazan je pojednostavljeni trolpolni model nadzemnog voda, kabela, generatora i odvodnika, a na slici 3. model 16 zavoja prvog svitka jedne faze statorskog namota.



Slika 2. Tropolni model u ATPDraw-u



Slika 3. Model prvog svitka faze statorskog namota

Modelirano je 11 raspona jedne trojke nadzemnog voda 10(20) kV, slika 4. Vod je zaključen istim nadzemnim vodom veće duljine radi izbjegavanja refleksije na kraju voda.

Pri modeliranju svakog raspona nadzemnog voda usvojeni su slijedeći podaci:

- Vodič Al/Če 50/8 mm², unutarnji radijus 0,16 cm, vanjski radijus 0,48 cm, specifični otpor 0,5946 Ω/km;
- Specifični otpor tla 2000 Ωm;
- Visine vodiča su kako slijedi: gornja faza 11 m, srednja faza 9,5 m, donja faza 8 m. Gornja i donja faza su na istoj vodoravnoj udaljenosti dok je srednja faza isturena 0,5 m.

Izabran je JMarti model uz uključeni skin efekt i realnu transformacijsku matricu. Parametri svakog raspona su izračunati u 8 dekada po 10 točaka uz inicijalnu frekvenciju 0,1 Hz. Frekvencijska matrica je izračunata za frekvenciju 100 kHz.

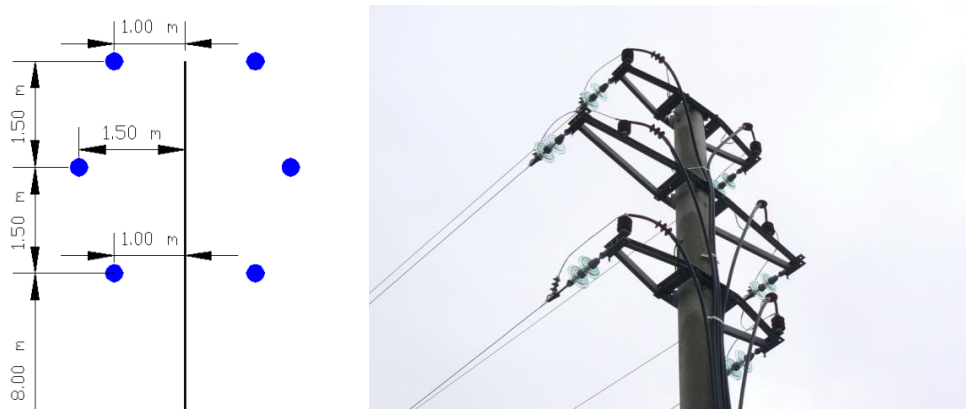
SN kabel XHE 49-A 3x(1x150/25 mm²) je modeliran na sličan način. Modelirane su tri dionice kabela: od prvog stupa nadzemnog voda do rasklopnog postrojenja u MHE (2,27 km), od rasklopnog postrojenja do generatora (30 m) te od generatora do ormara zvezdišta (30 m).

Svaka faza generatora je modelirana valnom impedancijom 2270 Ω, koja je izračunata iz izmjerenih vrijednosti kapaciteta i induktiviteta te uzdužnim otporom 0,001351587 Ω/m. Duljina namota jedne faze je 917,44 m. Namot svake faze se sastoji iz 20 svitaka, a svaki svitak iz 16 zavoja. Prvi svitak

je modeliran zavoj po zavoj, kako bi se mogao promatrati napon između zavoja, pri nailasku strmog čela prenaponskog vala. Serijski kapacitet između pojedinih zavoja svitka je izračunat i izmjeren (210 pF/m), slika 5.

Odvodnici prenapona različitih trajnih radnih napona i klase odvođenja su modelirani koristeći [9]-[11]. Modeliran je odvodnik prenapona $U_C=12$ kV, koji je postavljen, u sve tri faze, na mjestu prijelaza nadzemnog voda u kabel i u rasklopnom postrojenju MHE. Model odvodnika prenapona $U_C=11$ kV postavljen je na priključke generatora, a model odvodnika prenapona $U_C=7$ kV u ormar zvjezdišta.

Spoj odvodnika prenapona i referentne zemlje na stupu je modeliran induktivitetom $10 \mu\text{H}$ i otporom rasprostiranja 20Ω . Spoj odvodnika prenapona i referentne zemlje u rasklopnom postrojenju MHE i u ormaru zvjezdišta je modeliran otporom $10 \text{m}\Omega$ i induktivitetom $10 \mu\text{H}$. Odvodnici prenapona na generatoru su izravno priključeni na referentnu zemlju.



Slika 4. Stup 1 dvostustavnog 10(20) kV nadzemnog voda



Slika 5. Komad izoliranog vodiča statorskog namota

4 SIMULACIJE PRENAPONA USLIJED UDARA MUNJE U FAZNI VODIČ NADZEMNOG VODA

U proračunima se simulira prvi ili ponovni udar. Za prvi udar je strmina vala manja nego li za ponovni udar, ali je amplituda obično veća. Simuliran je slučaj izravnog udara munje 10 kA u fazni vodič na prvom stupu prije prijelaza nadzemnog voda u kabel, te udar munje amplitude 70 kA u fazni vodič na drugom stupu.

4.1 Udar munje amplitude 10 kA bez nastanka preskoka

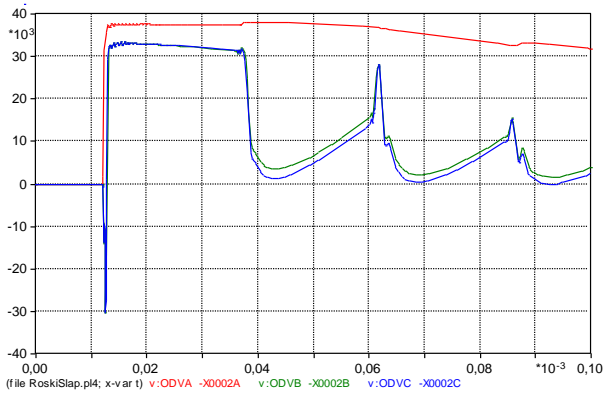
U prvom slučaju modeliran je udar amplitude 10 kA i maksimalne strmine $S_m=65 \text{kA}/\mu\text{s}$ bez nastanka preskoka. Prema [12] samo 5% udara struje munje može imati veću strminu. Pretpostavljen je vrlo nepovoljni slučaj udara munje u prvi stup prije prijelaza nadzemnog voda u kabel. Udari munje dalje od prvog stupa (amplitude i manje od 10 kA) sigurno će prouzročiti preskok preko izolatora nadzemnog voda. Preskok preko izolatora smanjuje amplitudu prenaponskog vala i povoljan je sa stajališta prenaponske zaštite.

Odvodnici prenapona su postavljeni na prijelazu nadzemni vod – kabel, te u rasklopnom postrojenju MHE. Na slikama koje slijede prikazani su valni oblici napona na mjestima kako je opisano ispod slike.

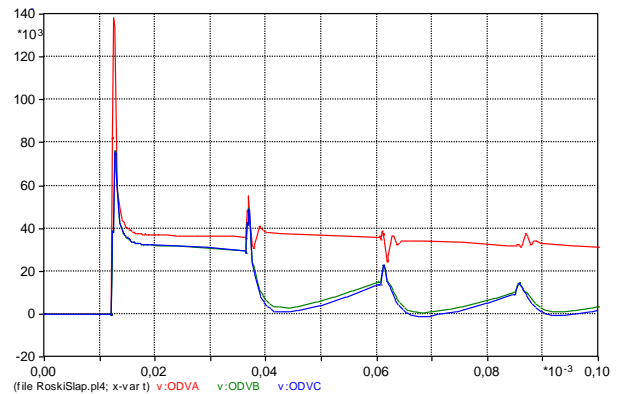
Izolacija generatora je ispitana kratkotrajnim (1. min.) podnosivim naponom $U_{\text{p}}=22 \text{ kV}$ ($2U_n+1 \text{ kV}$), [5]. Za izolaciju generatora se može pretpostaviti podnosivi atmosferski prenapon $U_A=50 \text{ kV}$. Za generatore se može usvojiti zaštitni koeficijent $k = 1,15$ pa se dobije koordinacijski podnosivi udarni napon generatora $43,5 \text{ kV}$.

Iz slika 8. i 9. je očigledno da su prenaponi na generatoru previsoki i da bi u slučaju udara munje, i relativno male amplitude, u prvih nekoliko raspona nadzemnog voda, prije prijelaza u kabel, vrlo vjerojatno došlo do oštećenja izolacije generatora prema masi.

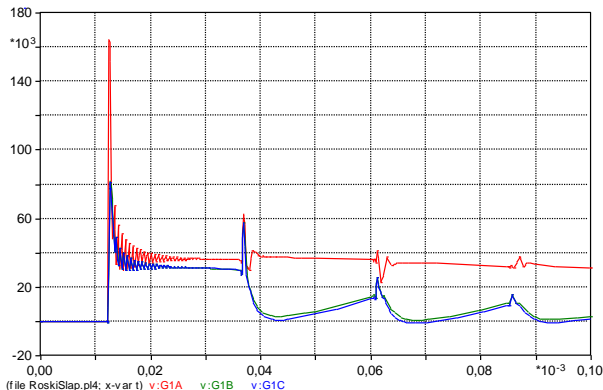
U simulacijama koje slijede, odvodnici prenapona su postavljeni, osim na prijelazu nadzemni vod – kabel i u rasklopnom postrojenju MHE, dodatno na priključnicama generatora i u ormaru zvjezdišta generatora (poboljšanje prenaponske zaštite). Na slici 10. je prikazan napon na priključnicama generatora, a na slici 11. na krajevima namota generatora.



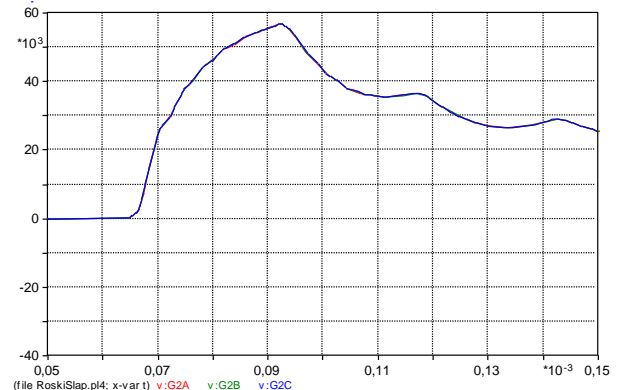
Slika 6. Valni oblici napona na odvodnicima prenapona u rasklopnom postrojenju MHE ($V_{\text{amax}}=38,05 \text{ kV}$; $V_{\text{bmax}}=33,34 \text{ kV}$; $V_{\text{cmax}}=33,34 \text{ kV}$)



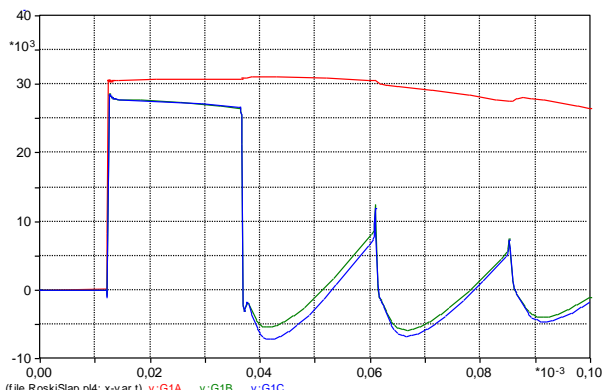
Slika 7. Valni oblici napona u rasklopnom postrojenju MHE, prema referentnoj zemlji ($V_{\text{amax}}=138,10 \text{ kV}$; $V_{\text{bmax}}=76,12 \text{ kV}$; $V_{\text{cmax}}=75,65 \text{ kV}$)



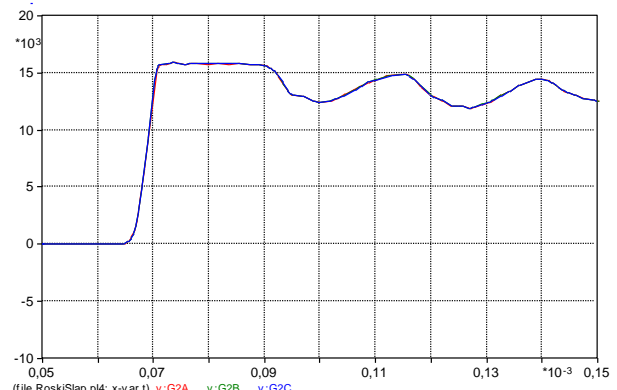
Slika 8. Valni oblici napona na priključnicama generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{\text{amax}}=164,42 \text{ kV}$; $V_{\text{bmax}}=82,04 \text{ kV}$; $V_{\text{cmax}}=81,22 \text{ kV}$)



Slika 9. Valni oblici napona na krajevima namota generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{\text{amax}}=56,80 \text{ kV}$; $V_{\text{bmax}}=56,77 \text{ kV}$; $V_{\text{cmax}}=56,77 \text{ kV}$)



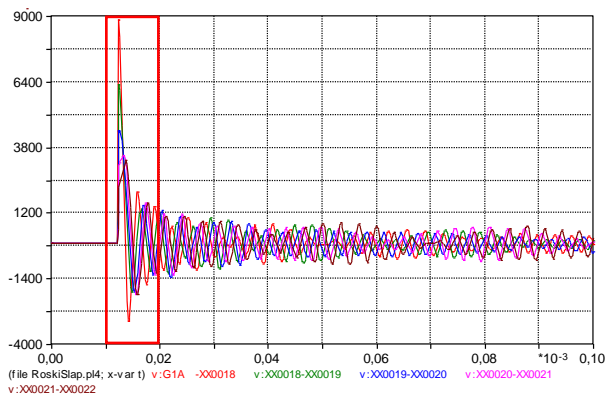
Slika 10. Valni oblici napona na priključnicama generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{\text{amax}}=31,10 \text{ kV}$; $V_{\text{bmax}}=28,53 \text{ kV}$; $V_{\text{cmax}}=28,53 \text{ kV}$)



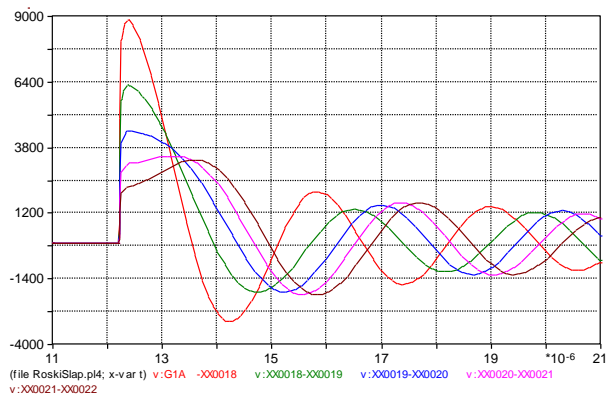
Slika 11. Valni oblici napona na krajevima namota generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{\text{amax}}=15,90 \text{ kV}$; $V_{\text{bmax}}=15,90 \text{ kV}$; $V_{\text{cmax}}=15,90 \text{ kV}$)

Iz slika 10. i 11. je očigledno da odvodnici prenapona na priključnicama generatora i u ormaru zvjezdišta znatno snižavaju prenapone na generatoru, što bi trebalo biti dovoljno za zaštitu njegove izolacije prema masi.

Slijedeće pitanje koje treba razmotriti je raspodjela prenapona između nekoliko prvih zavoja prvog svitka statorskog namota generatora. Na slici 12. je prikazan prenapon na prvom zavoju, između prvog i drugog zavoja, drugog i trećeg zavoja, trećeg i četvrtog zavoja te četvrtog i petog zavoja, prvog svitka faze u koju je udarila munja. Slika 13. je uvećani prikaz označenog dijela slike 12.



Slika 12. Valni oblik napona na prvim pet zavoja prvog svitka



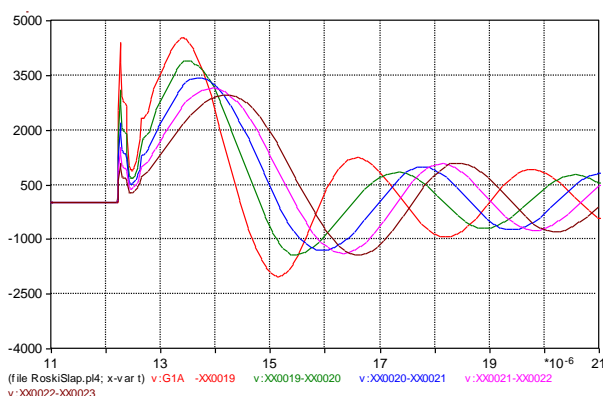
Slika 13. Valni oblik napona na prvim pet zavoja prvog svitka ($V_{1\max}=8,86$ kV; $V_{2\max}=6,29$ kV; $V_{3\max}=4,47$ kV; $V_{4\max}=3,47$ kV; $V_{5\max}=3,32$ kV)

Prema očekivanju najveći prenapon se pojavljuje na prvom zavoju prvog svitka.

Izolacija između zavoja je ispitana u VN laboratoriju kratkotrajnim (1. minutu) podnosivim naponom efektivne vrijednosti 15 kV. Uspoređujući izračunate amplitude prenapona i efektivne vrijednosti podnosivog ispitnog napona može se zaključiti da izolacija između dva zavoja može izdržati ovakav prenapon.

Treba napomenuti i da je razmatrani scenarij udara struje munje amplitude 10 kA, vrlo strmog čela, u prvi stup do prijelaza nadzemnog voda u kabel, bez preskoka na izolatoru vrlo malo vjerojatan.

Daljnje poboljšanje prenaponske zaštite izolacije generatora, poglavito međuzavojne izolacije prvog svitka, može se postići dodavanjem zaštitnih kondenzatora. Na slici 14. je prikazan napon na prvim pet zavoja prvog svitka uz priključen zaštitni kondenzator kapaciteta 0,25 μ F po fazi. Prvo nadvišenje na slici 14. je posljedica oscilacije spojnog kabela (u duljini 2 m) između priključnica generatora i kondenzatora. Spojni kabel (kako na strani napona tako i na strani zemlje) treba biti što je moguće kraći (ne dulji od 2 m).



Slika 14. Valni oblik napona na prvim pet zavoja prvog svitka ($V_{1\max}=4,54$ kV; $V_{2\max}=3,91$ kV; $V_{3\max}=3,43$ kV; $V_{4\max}=3,15$ kV; $V_{5\max}=2,97$ kV)

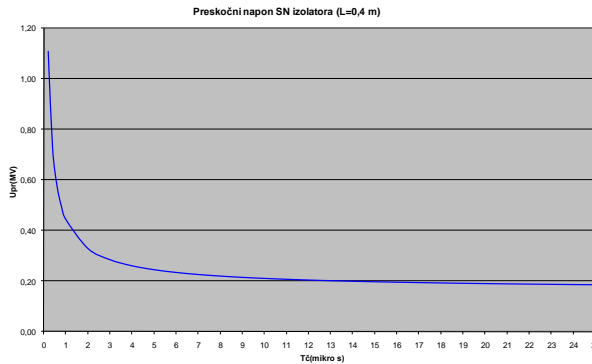
4.2. Udar munje amplitude 10 kA uz nastanak preskoka

U ovom slučaju modeliran je isti udar munje (amplitude 10 kA i maksimalne strmine $S_m=65$ kA/ μ s) ali je u model uključena mogućnost nastanka preskoka. Modelirana vremenska ovisnost nastanka preskoka SN izolatora prikazana je na slici 15. Dakle, ako prenapon na SN izolatoru presiječe prikazanu krivulju doći će do preskoka, u suprotnom slučaju ne.

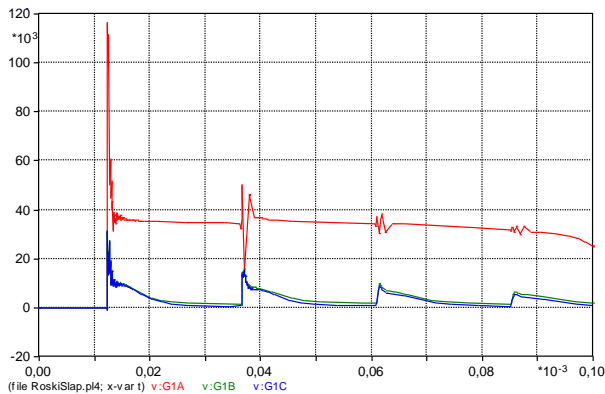
Pretpostavljen je isti, vrlo nepovoljni slučaj udara munje u prvi stup prije prijelaza nadzemnog voda u kabel. U ovom slučaju dolazi do preskoka preko izolatora pogođene faze na mjestu udara i na susjednom stupu u istoj fazi.

Odvodnici prenapona su postavljeni na prijelazu nadzemni vod – kabel, te u rasklopnom postrojenju MHE. Na slikama 16. i 17. prikazani su valni oblici napona na mjestima kako je opisano ispod slike. Iz slike 16. je očigledno da su prenaponi na generatoru previsoki i da bi u slučaju udara munje, i relativno male amplitude, uz nastanak preskoka, u prvih nekoliko raspona nadzemnog voda, prije prijelaza u kabel, vjerojatno došlo do oštećenja izolacije generatora prema masi.

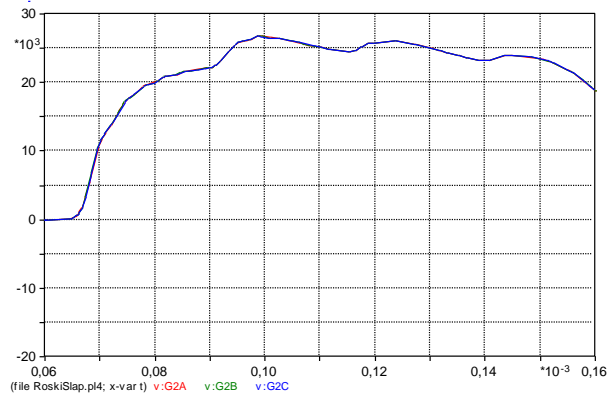
U simulacijama koje slijede, odvodnici prenapona su postavljeni, osim na prijelazu nadzemni vod – kabel i u rasklopnom postrojenju MHE, dodatno na priključnicama generatora i u ormaru zvjezdišta generatora (poboljšanje prenaponske zaštite). Na slici 18. je prikazan napon na priključnicama generatora, a na slici 19. napon na krajevima namota generatora.



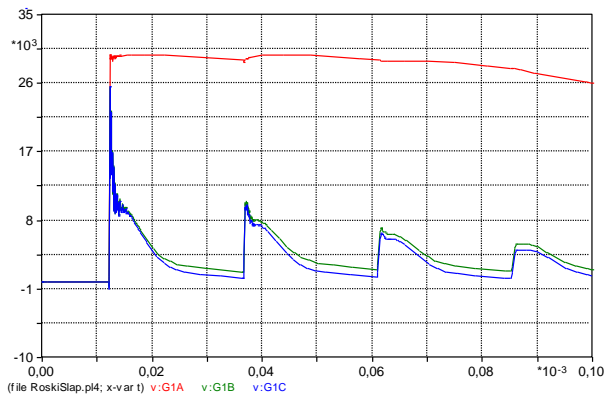
Slika 15. Modelirana vremenska ovisnost preskočnog napon SN izolatora



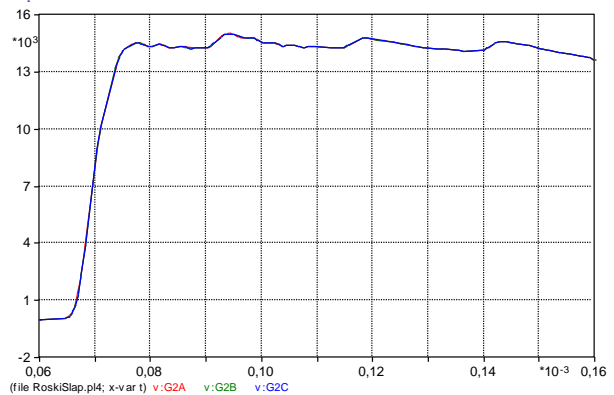
Slika 16. Valni oblici napona na priključnicama generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=116,53$ kV; $V_{bmax}=31,48$ kV; $V_{cmax}=31,38$ kV)



Slika 17. Valni oblici napona na krajevima namota generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=26,76$ kV; $V_{bmax}=26,76$ kV; $V_{cmax}=26,76$ kV)



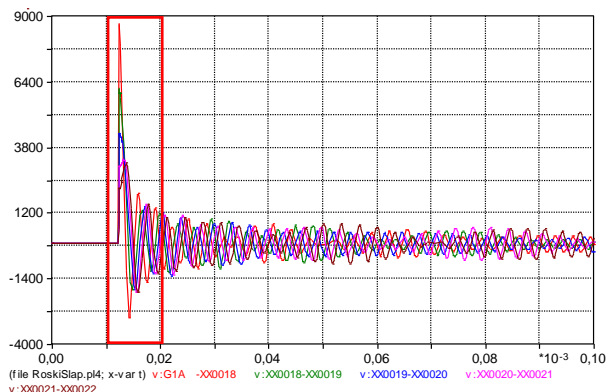
Slika 18. Valni oblici napona na priključnicama generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=29,80$ kV; $V_{bmax}=25,58$ kV; $V_{cmax}=25,56$ kV)



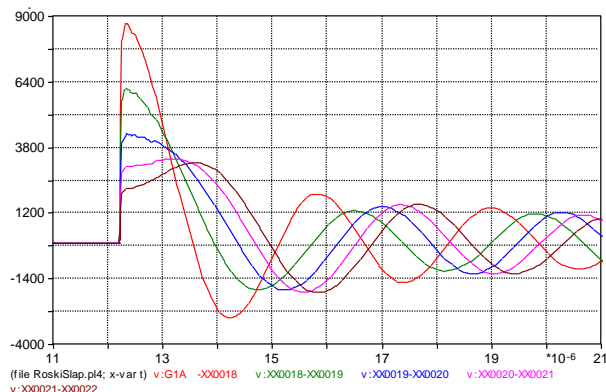
Slika 19. Valni oblici napona na krajevima namota generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=15,01$ kV; $V_{bmax}=15,00$ kV; $V_{cmax}=15,00$ kV)

Iz slika 18. i 19. je očigledno da odvodnici prenapona na priključnicama generatora i u ormaru zvjezdišta znatno snižavaju prenapone na generatoru, što bi trebalo biti dovoljno za zaštitu njegove izolacije prema masi.

I ovdje će se razmotriti pitanje raspodjela prenapona po pet prvih zavoja prvog svitka statorskog namota generatora. Na slici 20. je prikazan prenapon na prvom zavoju, između prvog i drugog zavoja, drugog i trećeg zavoja, trećeg i četvrtog zavoja te četvrtog i petog zavoja, prvog svitka faze u koju je udarila munja. Slika 21. je uvećani prikaz označenog dijela slike 20.



Slika 20. Valni oblik napona na prvim pet zavoja prvog svitka



Slika 21. Valni oblik napona na prvim pet zavoja prvog svitka ($V_{1max}=8,73$ kV; $V_{2max}=6,17$ kV; $V_{3max}=4,36$ kV; $V_{4max}=3,36$ kV; $V_{5max}=3,21$ kV)

Kao i u prethodnoj simulaciji, najveći prenapon se pojavljuje na prvom zavoju prvog svitka. Uspoređujući izračunate amplitude prenapona i efektivne vrijednosti podnosivog ispitnog napona može se zaključiti da izolacija između dva zavoja može izdržati ovakav prenapon.

Simulacijama, uz uzimanje u obzir mogućnosti nastanka preskoka, se pokazalo da su prenaponi u svim slučajevima nižih vrijednosti. To je potpuno u skladu s očekivanjima jer se preskokom odvodi dio energije prenaponskog vala pa su, shodno tome, amplitude prenapona na svim promatranim mjestima manje.

4.3. Udar munje amplitude 70 kA

Modeliran je udar munje amplitude 70 kA i maksimalne strmine $S_m = 40$ kA/ μ s. Pretpostavljen je vrlo nepovoljan slučaj udara munje u drugi stup prije prijelaza nadzemnog voda u kabel.

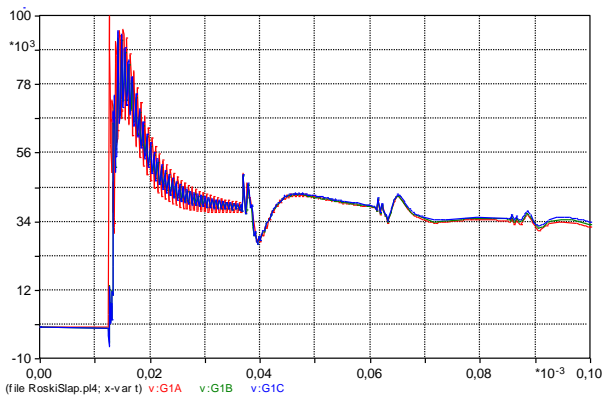
U ovom slučaju dolazi do preskoka preko izolatora u sve tri faze pogođenog i prvog stupa do prijelaza nadzemnog voda u kabel, dvije faze susjednog stupa te dvije faze slijedećeg stupa.

Odvodnici prenapona su postavljeni na prijelazu nadzemni vod – kabel, te u rasklopnom postrojenju MHE. Iz slika 22. i 23 je očigledno da su prenaponi na generatoru previsoki i da bi u slučaju udara munje velike amplitude, u prvih nekoliko raspona nadzemnog voda, prije prijelaza u kabel, vjerojatno došlo do oštećenja izolacije generatora prema masi.

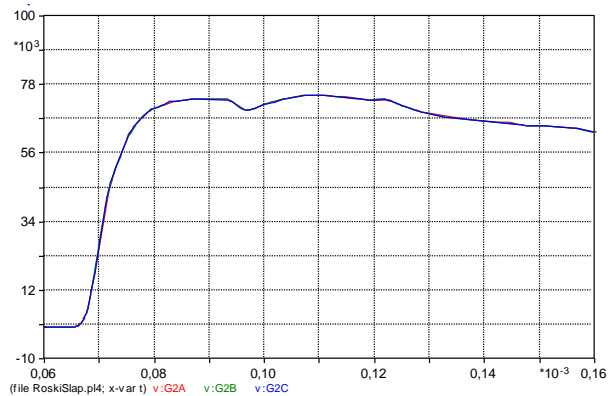
U simulacijama koje slijede, odvodnici prenapona su postavljeni, osim na prijelazu nadzemni vod – kabel i u rasklopnom postrojenju MHE, dodatno na priključnicama generatora i u ormaru zvjezdišta generatora (poboljšanje prenaponske zaštite). Na slici 24. je prikazan napon na priključnicama generatora a na slici 25. na krajevima namota generatora.

Iz slika 24. i 25. je očigledno da odvodnici prenapona na priključnicama generatora i u ormaru zvjezdišta znatno snižuju prenapone na generatoru, što bi trebalo biti dovoljno za zaštitu njegove izolacije prema masi.

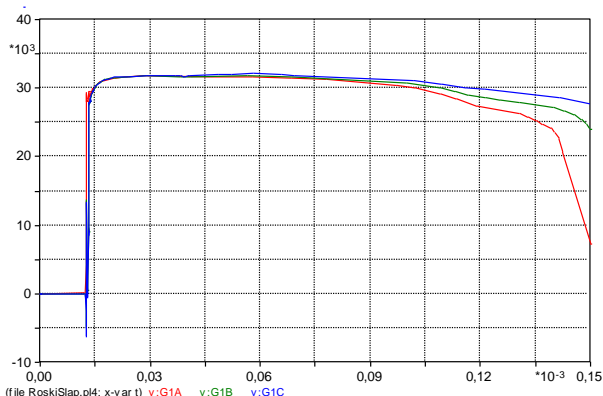
I u ovom slučaju udara munje je razmotreno pitanje raspodjela prenapona po pet prvih zavoja prvog svitka statorskog namota generatora. Kao i u prethodnim simulacijama, najveći prenapon se pojavljuje na prvom zavoju prvog svitka. Izračunate amplitude prenapona su niže od efektivne vrijednosti podnosivog ispitnog napona međuzavojene izolacije pa se može zaključiti da izolacija između dva zavoja može izdržati ovakav prenapon.



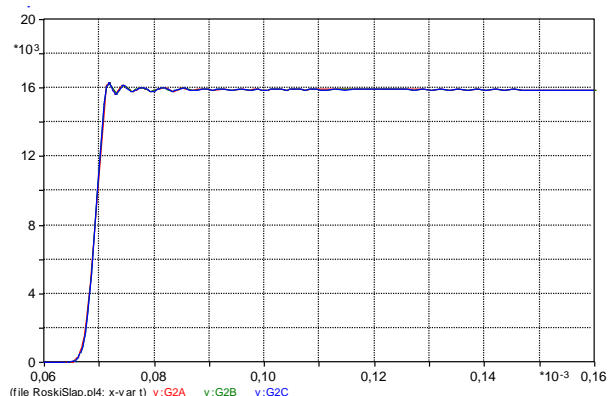
Slika 22. Valni oblici napona na priključnicama generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=99,95$ kV; $V_{bmax}=93,03$ kV; $V_{cmax}=95,47$ kV)



Slika 23. Valni oblici napona na krajevima namota generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=74,67$ kV; $V_{bmax}=74,67$ kV; $V_{cmax}=74,67$ kV)



Slika 24. Valni oblici napona na priključnicama generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=31,75$ kV; $V_{bmax}=31,82$ kV; $V_{cmax}=32,15$ kV)



Slika 25. Valni oblici napona na krajevima namota generatora, prema referentnoj zemlji ($V_{amax}=16,34$ kV; $V_{bmax}=16,32$ kV; $V_{cmax}=16,32$ kV)

5. ZAKLJUČAK

Prenaponska zaštita svakog generatora, koji je projektiran za izravan spoj na nadzemnu mrežu (bez blok transformatora), treba biti detaljno analizirana.

Izbor odvodnika prenapona za prenaponsku zaštitu generatora treba uzeti u obzir sve moguće scenarije nastanka privremenih prenapona.

Osim odvodnika prenapona na prijelazu nadzemnog voda u kabel i u rasklopnom postrojenju, za učinkovitu prenaponsku zaštitu generatora, u nekim slučajevima, su potrebni i odvodnici prenapona instalirani na njegovim priključnicama i u neutralnoj točki.

Daljnje poboljšanje prenaponske zaštite izolacije statorskog namota generatora, naročito međuzavojne izolacije prvog svitka, može se postići ugradnjom zaštitnih kondenzatora. U razmatranom slučaju je zaključeno da zaštitni kondenzatori nisu potrebni.

Uzemljenjem nosača izolatora, na prva tri drvena stupa odvojka SN mreže, nastankom preskoka, smanjuje se amplituda prenapona koji stižu dalekovodom, što je također povoljno sa stanovišta prenaponske zaštite generatora.

5. LITERATURA

- [1] IEC 60071-1:2006, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules.
- [2] L. Thione: Insulation Coordination in Electrical Power Systems, Theory and Application, Tutorial, ALPI, Milan, August 2001.
- [3] R.W. Powell, A.R. Hileman, M. Maxwell: Lightning Protection of Rotating Machines Directly Connected to Overhead Lines, Transaction of the American Institute of Electrical Engineers, Volume 81, No. 3, 721-728, April, 1962

- [4] IEC 60034-15:2009, Rotating electrical machines –Part 15: Impulse voltage withstand levels of form-wound stator coils for rotating a.c. machines.
- [5] IEC 60034-1:2004, Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance.
- [6] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz, C. Mazzetti: Response of Multiconductor Power Lines to Nearby Lightning Return Stroke Electromagnetic Fields, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 12, No. 3, July 1997.
- [7] B. Filipovic-Grcic, I. Uglesic, A. Xemard: Selection of Station Surge Arresters for Control of Slow-front Overvoltages on Compact Lines, CIGRE C4 Colloquium on Lightning and Power System, Kuala Lumpur, May 2010.
- [8] ATPDraw, Windows Version 5.5 NTNU/SINTEF, Norway.
- [9] EN 60099-5:1996, Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations.
- [10] IEC 60099-4: 1991, Surge Arresters – Part 4: Metal – oxide Surge arresters without Gaps for A.C. Systems.
- [11] ABB: Application Guidelines – Overvoltage Protection: Dimensioning, testing and application of metal oxide surge arresters in medium voltage systems, 01.05.09.
- [12] CIGRE, Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission lines, Paris, October 1991.