DOI: 10.2478/bhee-2015-0010

Izvorni naučni rad/Original scientific paper

METODA PROCJENE VJEROJATNOSTI ISPADA SREDNJENAPONSKOG NADZEMNOG VODA ZBOG UDARA MUNJE

THE METHOD FOR ESTIMATING THE OUTAGE PROBABILITY OF MEDIUM VOLTAGE OVERHEAD LINE CAUSED BY LIGHTNING

Drago Bago[1]

Sažetak: U radu je opisana primjena podataka o atmosferskim pražnjenjima dobivenim iz sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja za unaprjeđenje planiranja i pogona srednjenaponskog elektroenergetskog sustava. Posebno će se dati naglasak na korelaciju između kvarova i zastoja u elektroenergetskoj distribucijskoj mreži srednjeg napona i udara munje. Analiza će se provesti na tipičnim nadzemnim srednjenaponskim dalekovodima sa stvarnim podacima atmosferskih pražnjenja i kvarova u mreži prikupljenih u razdoblju od 2009. do 2014. godine, pri čemu će se promatrati vremensko i prostorno poklapanje podataka. Na osnovi provedenih istraživanja očekuje se razvoj odgovarajuće metode za određivanje vjerojatnosti utjecaja munje na pogon, odnosno, ispad specifičnog nadzemnog dalekovoda u srednjenaponskom elektroenergetskom sustavu.

Ključne riječi: atmosferska pražnjenja, sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja, relejna zaštita, vremenska i prostorna korelacija, ispadi i kvarovi dalekovoda

Abstract: This paper describes the application of the lightning strokes data based on the Lightning Location System (LLS) for improving of planning and operation of the medium voltage power system. Emphasis will be given to the application of correlation between failures and outages in the medium voltage distribution network and lightning. The analysis was carried out on typical overhead medium voltage power lines with data from LLS and failures in the power network registered in the period from 2009 to 2014. Temporal and spatial event correlation was analyzed. Based on the conducted research a method for determining the probability of lightning caused outages of the overhead line in medium voltage power system was developed.

Key words: lightning, lightning location system, overhead lines, temporal and spatial correlation, failure and outage of the medium voltage overhead lines

UVOD

Cilj rada je razvoj procedure za procjenu vjerojatnosti ispada tipičnog nadzemnog 10(20) kV dalekovoda zbog utjecaja udara munje. Pri tome će se pomoću teorije vjerojatnosti i statistike, a na osnovi trenutnih i povijesnih podataka iz sustava za lociranje atmosferskih pražnjena (SLAP) i sustava za daljinski nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka (SCADA), dobiti 3D krivulja kao funkcija distribucije vjerojatnosti ispada (*CDF – Cumulative Distribution Function*) u ovisnosti o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA). Cilj je odrediti funkciju aproksimacije za relevantno predviđanje ispada u slučaju budućih udara munje u ovisnosti o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA).

Pritom će biti korištena metoda korelacije podataka o udarima munja i događaja u pogonu SN mreža pomoću podataka dobivenih o stvarnim ispadima nadzemnih SN distribucijskih dalekovoda iz SCADA sustava, koreliranih s podacima iz SLAP-a i to prostornom korelacijom za razdoblje 2009.-2012. i prostorno-vremenskom korelacijom za razdoblje 2012.-2014.

Osnovni razlozi koji upućuju na ovakav vid istraživanja su:

- Uspostavljanje, vođenje i nadzor elektroenergetskog sustava
- Upozoravanje timova na terenu o nailasku grmljavinskog nevremena
- Izbor trasa nadzemnih vodova i načina njihove zaštite od udara munja

[1] JP Elektroprivreda HZ HB d.d. Mostar
drago.bago@ephzhb.ba
Rad dostavljen: novembar 2015. Rad prihvaćen: decembar 2015.

- Informacije iz sustava za lociranje munja mogu predstavljati značajnu pomoć dispečerima u vođenju pogona, pa je tako moguće:
  - brzo angažirati osoblje za održavanje i uputiti ga na mjesto kvara,
  - poslati upozorenje pogonskom osoblju o približavanju grmljavinske oluje prilikom radova na vodovima, u vanjskim postrojenjima ili kod većih ispitivanja u mreži,
  - obavijestiti osoblje da je grmljavinska fronta potpuno napustila dato područje ili pogonsku zonu,
  - korelirati podatke sustava lokalizacije munja s podacima o ispadima i kvarovima u mreži, što može doprinijeti kvaliteti praćenja pogona,
  - utvrditi uzrok prorade prekidača; tj. ocijeniti da li je isklop posljedica trajnog kvara ili prijelazne pojave uzrokovane udarom munje,
  - mogu se utvrditi zone s najvećim brojem udara duž trase dalekovoda, na kojima se najčešće pojavljuju povratni preskoci, jer su to mjesta prioriteta ugradnje odvodnika prenapona i drugih sredstava zaštite od prenapona.
- Mikrolokacija udara munje, determinirana LLS-om bi se mogla koristiti kao informacija o mjestu kvara na nadzemnom SN vodu, posebice u slučajevima kada funkcija lokacije kvara na sustavu relejne zaštite nije dostupna.
- Korelacijom podataka o atmosferskim pražnjenjima s podacima o događajima u elektroenergetskom sustavu moguće je utjecati na poboljšanje pouzdanosti opskrbe električnom energijom i povećanje kvalitete električne energije.
- Statističkom i prostornom obradom podataka o atmosferskim pražnjenjima moguće je identificirati dijelove mreže s povećanim rizikom od udara munja te odrediti vjerojatnost udara pojedinih amplituda struja munja, što uvelike može pomoći u izboru trasa nadzemnih SN vodova i načina njihove zaštite od udara munja.

1. ISTRAŽIVANJA ISPADA SN VODA ZBOG MUNJE

Atmosferska pražnjenja utječu na pouzdanost pogona prijenosnih i distribucijskih vodova. Za elektroenergetska distribucijska postrojenja i vodove neusporedivo su najopasniji prenaponi atmosferskog porijekla. Oni pripadaju kategoriji vanjskih prenapona i njihova je vrijednost potpuno neovisna o pogonskom naponu mreže. Atmosferske utjecaje na distribucijsku mrežu je teško izbjeći, što ima za posljedicu da je daleko najveći broj kvarova i smetnji u distribucijskim postrojenjima uzrokovan upravo atmosferskim prenaponima. Atmosferski prenaponi nisu ovisni o načinu uzemljenja zvjezdišta elektroenergetske mreže, a u postupcima ispitivanja dielektrične čvrstoće izolacije se simuliraju standardnim udarnim naponom valnog oblika 1,2/50 kV/μs.

Uslijed atmosferskih prenapona javlja se najčešće preskok izolacije koja ne može podnijeti iznos električnog polja koji se javlja pri nastalim prenaponima. Zbog preskoka izolacije može doći do trajnog ili privremenog ispada i kvara. Takvi događaji u elektroenergetskoj mreži bilježe se i prikupljaju pomoću SCADA ili sličnih sustava za nadzor, upravljanjem i prikupljanjem podataka iz mreže i sustava.

Dosadašnja istraživanja vezana za procjenu vjerojatnosti ispada voda zbog munje zaključuju da su munje glavni uzrok kvarova na tipičnim nadzemnim distribucijskim vodovima. Ovi kvarovi mogu uzrokovati privremene i trajne prekide napajanja na nadzemnim distribucijskim vodovima. Smatra se da 5-10 % svih kvarova uzrokovanih munjom ima za posljedicu trajno oštećenje opreme na nadzemnim distribucijskim vodovima [1]. Udar munje stvara elektromagnetsko polje koje u nadzemnim vodovima, ako se nalaze u blizini, inducira prenapone (tzv. indirektni udar munje). Takvi inducirani prenaponi su znatno manji od prenapona koji nastaju uslijed direktnog udara munje u vodiče nadzemnog voda, ali još uvijek mogu biti dovoljno visoki da prekorače izolacijsku razinu srednjenaponskih vodova, pogotovo ukoliko se radi o naponskoj razini 10 kV ili 20 kV. Dodatno, zbog relativno male visine, 10 kV i 20 kV vodovi su često djelomično ili potpuno zaštićeni susjednim objektima (npr. stablima) od opasnih direktnih udara munje, ali su izloženi induciranim prenaponima [2].

U postojećoj znanstvenoj i stručnoj literaturi analizirani su mnogi numerički pristupi za procjenu vrijednosti induciranog prenapona, kao posljedice udara munje s primjenom na srednjenponske nadzemne distribucijske mreže [3].

U zadnjih nekoliko godina svjetski mjerodavne znanstvene/stručne organizacije (CIGRÉ i IEEE) objavljuju načine i preporuke za štićenje nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih dalekovoda od udara munje, odnosno, atmosferskih prenapona [4]-[7].

Dosadašnja istraživanja djelovanja munje na pogon nadzemnih SN distribucijskih dalekovoda pokazuju da je stopa preskoka niža za manje visine voda, za veće razine izolacije na vodu, za manju vrijednost specifičnog otpora tla, odnosno, manju vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača, te za manje amplitude struje munje [8].

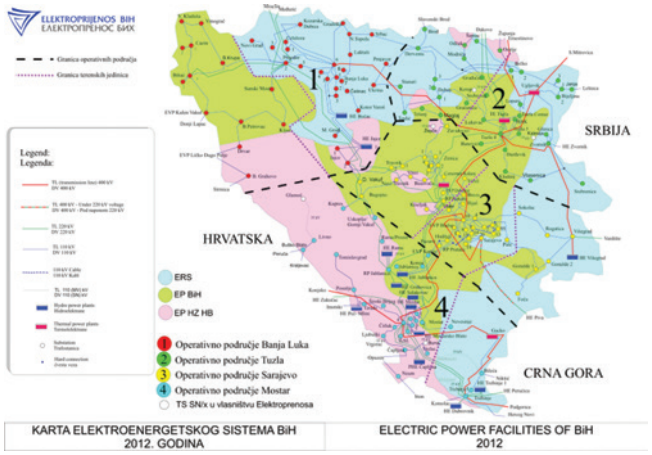
Istraživanja zaštite nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih dalekovoda od prenapona nastalih direktnim ili indirektnim udarima munje pokazuju zadovoljavajuće rezultate s primjenom odvodnika prenapona na udaljenostima manjim od 400 m, ili još manjim u slučaju većih specifičnih otpora tla. Najbolje mjere zaštite od prenapona daje kombinacija zaštite sa zaštitnim užetom i odvodnicima prenapona [9].

Štićenje SN voda može se izvesti produljenjem visine stupa, ali samo u slučaju zadovoljavajućih vrijednosti

otpora rasprostiranja uzemljivača, jer u suprotnom može doći do povratnog prenaponskog preskoka [10]. U srednjenaponskim mrežama smještenim u područjima s visokim izokerauničkim nivoima, djelovanja munja mogu biti uzrokom za više od 80 % privremenih ili trajnih kvarova [11].

2. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV BIH - ODABRANI SN VODOVI KAO PREDMET ANALIZE

Bosna i Hercegovina ima jedan operator sustava koji je nadležan za cijelo područje BiH - Neovisni operator sustava BiH (NOSBiH). Djelatnosti NOS-a uključuju upravljanje sustavom prijenosa u svrhu osiguranja pouzdanosti, upravljanje sredstvima i uređajima u središnjem centru upravljanja, upravljanje balansnim tržištem i osiguranje sustavnih usluga. Također, u Bosni i Hercegovini postoji samo jedno poduzeće za prijenos električne energije s nadležnostima prijenosa električne energije na naponskim razinama 110 kV, 220 kV i 400 kV (Slika 1).

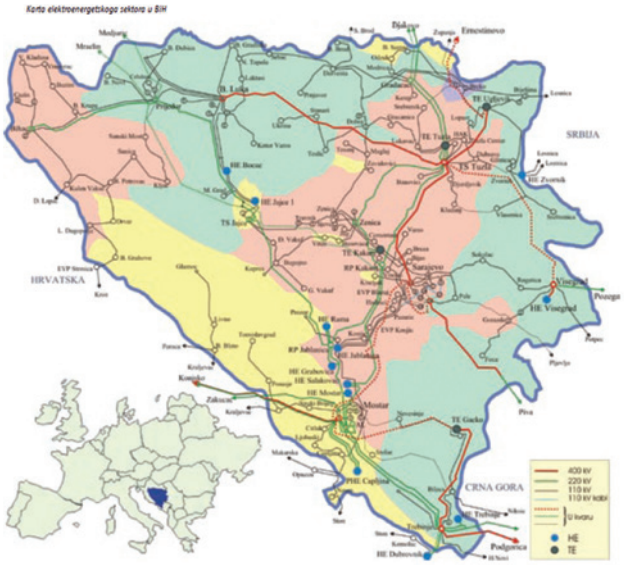


Slika 1: Elektroenergetski sustav BiH

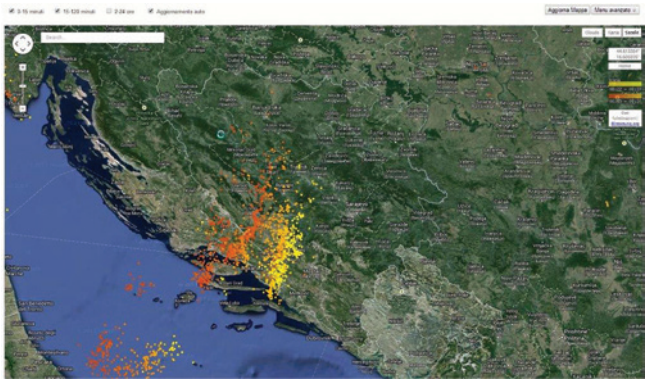
U BiH postoje tri elektroprivredna poduzeća koja su osim proizvodnje električne energije i djelatnosti opskrbe električnom energijom nadležne i za distribuciju električne energije. Svi odabrani nadzemni vodovi 10(20) kV se nalaze u nadležnosti Distribucijskog područja Jug ''Elektroprivrede HZ HB'' d.d. Mostar (Slike 2 i 3).

Odabrano je 14 nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih dalekovoda koji prolaze kroz tipične konfiguracije terena, s posebnostima specifičnih otpora tla, a koji zajedno reprezentativno odražavaju spektar podataka potrebnih za novu metodu korelacije koja će dati ulazne parametre za statističku procjenu očekivanja atmosferskih pražnjenja kao uzrokom ispada predmetnih nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih vodova.

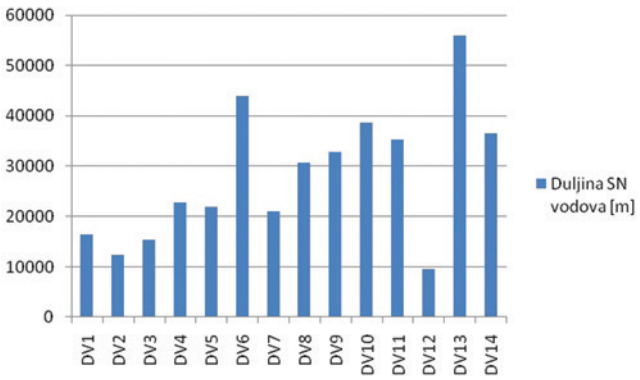
Duljine i površine alarm-zona predmetnih SN dalekovoda prikazane su na Slikama 4 i 5. Za provedbu empirijskog dijela istraživanja, izvršena je odgovarajuća priprema i prikupljanje podataka o ispadima nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih vodova (kao posljedica atmosferskih prenapona uzrokovanih direktnim ili induciranih prenapona uzrokovanih tzv. indirektnim udarima u blizini voda) kao ulazni skup podataka za korelaciju s relevantnim podacima iz odgovarajućeg sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja.



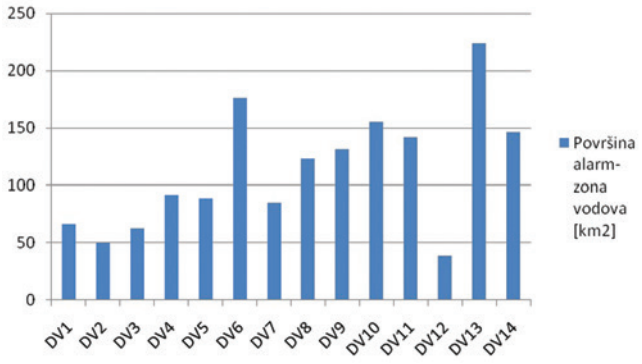
Slika 2: Elektroenergetski sustav BiH - područja nadležnosti elektroprivrednih poduzeća u BiH



Slika 3: Distribucijsko područje analizirane korelacije predmetnih nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih dalekovoda-munje na području DP Jug na dan 30.06.2014. godine u razdoblju od 120 min. (podaci prikupljeni iz sustava LINET)



Slika 4: Duljine analiziranih SN vodova



Slika 5: Površine alarm-zona po radijusu 2000 m od linije voda

3. METODA KORELACIJE PODATAKA O UDARIMA MUNJA I KVAROVA U SN MREŽAMA

Za provedbu korelacije neophodna je odgovarajuća priprema i prikupljanje podataka o ispadima nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih vodova (kao posljedica atmosferskih prenapona uzrokovanih direktnim ili indirektnim udarima u blizini voda) kao ulazni skup podataka za korelaciju s relevantnim podacima iz odgovarajućeg sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja.

Za potrebe koreliranja događaja unutar elektroenergetskog sustava (EES-a) s udarima munja bit će potrebno podatke sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja povezati s podacima o događajima u elektroenergetskoj mreži (SCADA sustavi u nadležnosti JP ''Elektroprivreda HZ HB'' i JP ''Elektroprijenos BiH''), te geoprostornim podacima elektroenergetskih objekata. Bitne komponente sustava kojim će se razviti procedura za procjenu vjerojatnosti utjecaja munje na pogon, odnosno, ispad specifičnog nadzemnog dalekovoda u srednjenaponskom elektroenergetskom sustavu su:

- sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja,
- sustavi za prikupljanje podataka o događajima u elektroenergetskom SN sustavu i
- sustav geoprostornih podataka o elektroenergetskim SN objektima.

A. Princip rada sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja

Moderno sredstvo za praćenje atmosferskih pražnjenja danas predstavljaju sustavi za lociranje atmosferskih pražnjenja. Takvi se sustavi neprekidno razvijaju već više od dvadesetak godina i neprekidno usavršavaju. U razvijenim zemljama diljem svijeta se sustavi za lociranje atmosferskih pražnjenja primjenjuju u mrežama i sustavima raspoređenim na velikim prostranstvima kao što su elektroenergetski sustavi, TK mreže, mreže RTV odašiljača, mreže naftovoda i plinovoda, sustavi osiguranja, vojne instalacije, meteorološki servisi, prometna infrastruktura, sustavi zaštita od šumskih požara i drugo.

Efikasnost sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja se neprekidno poboljšava, tako da se sa sve većom pouzdanošću može najprije predvidjeti pojava grmljavina na nekom području, a potom locirati mjesto i vrijeme udara pojedinih munja. U proteklom vremenu razvoja sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja pokazano je da su takvi sustavi efikasniji kada pokrivaju veće geografsko područje. Tako se npr. u SAD-u razvija nacionalna mreža za detekciju munja (*eng. National Lightning Detection Network; LDN*) koja pokriva gotovo cjelokupno geografsko područje SAD-a, a u Europi se razvijaju sustavi EUCLID i LINET [12]. Sustav za lociranje munja (LINET) je razvijen u Njemačkoj i trenutno broji preko 80 senzora postavljenih u više država Europe. Radi se o mreži senzora s centralnom jedinicom za obradu podataka.

Glavne prednosti LINET SLAP-a:

- Mogućnost detekcije i lociranja ukupnog atmosferskog pražnjenja (s jednakom točnošću) OO i OZ
- Visoka točnost detektiranja obje vrste pražnjenja s niskim amplitudama struje
- Nova 3D tehnika za pouzdano razlučivanje između OO i OZ pražnjenja
- Izvještaj o nadmorskoj visini OO pražnjenja
- Postizanje točnosti lokacije do 100 m
- Senzori kakvi se koriste u sustavu EUCLID imaju mikroprocesorsku jedinicu na otvorenom prostoru, koja je izložena atmosferskim prenaponima i mogućim oštećenjima, dok sustav LINET posjeduje vlastite senzore - antena i GPS uređaj - instalirani na vanjskom prostoru, povezanih kabelima na računalo (u zatvorenom prostoru), pa je tako računalo, kao najosjetljiviji dio sustava zaštićen od mogućih oštećenja uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima i prenaponima.

Za detekciju i lociranje atmosferskih pražnjenja nad teritorijem Bosne i Hercegovine, pored onih instaliranih u BiH, koriste se i senzori u okolnim državama. Krajem 2008. godine Hrvatska se priključila na LINET mrežu te je instalirano šest senzora na području Hrvatske (Zagreb, Rijeka, Split, Zadar, Dubrovnik, otok Korčula) [13]. Na području Srbije instalirana su dva senzora za detekciju i lociranje atmosferskih pražnjenja (Beograd i Niš).

Udaljenost između susjednih senzora iznosi oko 200-250 km.

Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja LINET koristi vrlo niski i niski (*eng. VLF/LF*) frekvencijski opseg i otkriva gustoću magnetskog toka pri atmosferskom pražnjenju pomoću dviju međusobno okomito postavljenih prstenastih antena.

Dva ortogonalna senzorska kruga mjere magnetsku indukciju kao vremensku funkciju u frekvencijskom rasponu (1 kHz - 200 kHz).

Komponente magnetske indukcije detektiranog signala mjere se pomoću ortogonalne petlje (antene) u stvarnom vremenu. Mjerena veličina je inducirana struja a ne napon, te se kao rezultat dobije vremenska ovisnost magnetske indukcije u rasponu 0,1 – 130 nT [14]-[18].

Osnovne funkcionalnosti ovise o podacima o atmosferskim pražnjenjima iz kojih se dobivaju nove spoznaje koje se primjenjuju na EES. Napredne funkcionalnosti se oslanjaju na međusobnu povezanost SLAP-a s drugim sustavima, te korelacijom podataka iz drugih izvora.

Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja, za potrebe ovog istraživanja, treba imati sljedeće osnovne i napredne funkcionalnosti:

- vizualizacija atmosferskih pražnjenja u stvarnom vremenu i alarmiranje o grmljavinskoj aktivnosti,
- analiziranje, izrada izvještaja i vizualizacija historijskih podataka o atmosferskim pražnjenjima,
- statistički proračuni nad podacima o atmosferskim pražnjenjima,
- izrada karata gustoće atmosferskih pražnjenja šireg područja,
- prostorna korelacija između podataka o atmosferskim pražnjenjima i alarmnim zonama generiranim oko dalekovoda i ostalih objekata EES-a,
- izrada visokorezolucijskih karata gustoće atmosferskih pražnjenja oko dalekovoda i ostalih objekata EES-a,
- korelacije između atmosferskih pražnjenja i događaja registriranih relejnom zaštitom u stvarnom vremenu.

B. Implementirani SCADA sustavi za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka

Prikupljeni podaci o događajima unutar EES-a, pomoću SCADA sustava, između ostalih, sadržavaju informaciju o točnom vremenu događaja te podatak o objektu (vod ili postrojenje) na kojemu se incident dogodio, te ostale eventualno potrebne podatke za korelaciju s podacima iz sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja. Potrebno je da oba sustava (SCADA i SLAP) vremenski budu sinkronizirana sustavom točnog vremena GPS-a, što je u konkretnom slučaju realizirano korištenjem podataka po UTC-u (*Universal Time Coordinated*) vremenu. Korišten je modularni sustav opremljen GPS prijemnikom najnovije generacije. Sustav točnog vremena sinkronizaciju vrši putem lokalne mreže (LAN). Rezolucija, uz format poruke vremena HH:MM:SS:mSS je usklađena prema IEC 61850-5/ G1.2/13.7.6 u uređajima upravljanja i zaštita ±1 ms.

Rezultati korelacije sadržavaju sljedeće podatke: vrijeme SCADA ispada po UTC-u, vrijeme SCADA ispada po lokalnom vremenu, naziv voda ili postrojenja (objekta), izvorna poruka operateru iz SCADA sustava, vremenska razlika uzročne pojave munje (SLAP) i posljedičnog ispada voda (SCADA), najmanja udaljenost od linije voda (objekta), vrijeme munje po UTC-u, tip atmosferskog pražnjenja (npr. OO - oblak-oblak ili OZ oblak-zemlja), amplitudna vrijednost struje pražnjenja, polaritet struje pražnjenja, pretpostavljena greška udaljenosti pražnjenja, točne koordinate udara munje, naziv voda čiju alarm zonu je promatrao SLAP i dr.

S obzirom da za spomenute kvarove u listama događaja staničnog računala postoje točni podaci o vremenu pobude uređaja relejne zaštite na vodu na kojem je nastao kvar, takvi događaji su prikladni za korelaciju prorade uređaja relejne zaštite i udara munje [19].

Postoji implementirani SCADA sustav daljinskog vođenja koji je u vlasništvu organizacijske cjeline Proizvodnja električne energije ''Elektroprivrede'' HZ HB (EP HZ HB), a čijim izvodima 10, 20 i 35 kV upravlja Distribucija električne energije EP HZ HB [20].

Također, postoji implementirani SCADA sustav daljinskog vođenja koji su u vlasništvu JP ''Elektroprijenos BiH'', a čijim izvodima 10, 20 i 35 kV upravlja Distribucija električne energije EP HZ HB [21]. Korišten je instalirani SCADA sustav u Operativnom području Mostar, proizvođača ''Siemens'', tip: SINAUT Spectrum 4.5.

Radi iskorištavanja šire funkcionalnosti daljinski upravljivih i nadziranih rastavnih sklopki (DUNRS) instaliranih u svrhu sekcioniranja nadzemnih SN vodova, izgrađen je sustav daljinskog vođenja (ProzaNet SCADA). Prozanet SCADA je višekorisnički distribuirani sustav za nadzor i upravljanje radom EES-a. Sustav podržava osnovne i napredne SCADA funkcije. Sustavom se nadzire rad EES-a u stvarnom vremenu (SCADA funkcije), a moguće je i analizirati stanja EE mreže (*on-line* ili *off-line* na temelju zadnjeg ili arhiviranog stanja) [22]. Na Slici 6 prikazan je primjer stanja rasklopne opreme 10(20) kV sabirnica po naponskim razinama u transformatorskom postrojenju 110/10(20) kV [23].

Slika 6: Primjer stanja rasklopne opreme 10(20) kV sabirnica po naponskim razinama u transformatorskom postrojenju 110/10(20) kV [23]

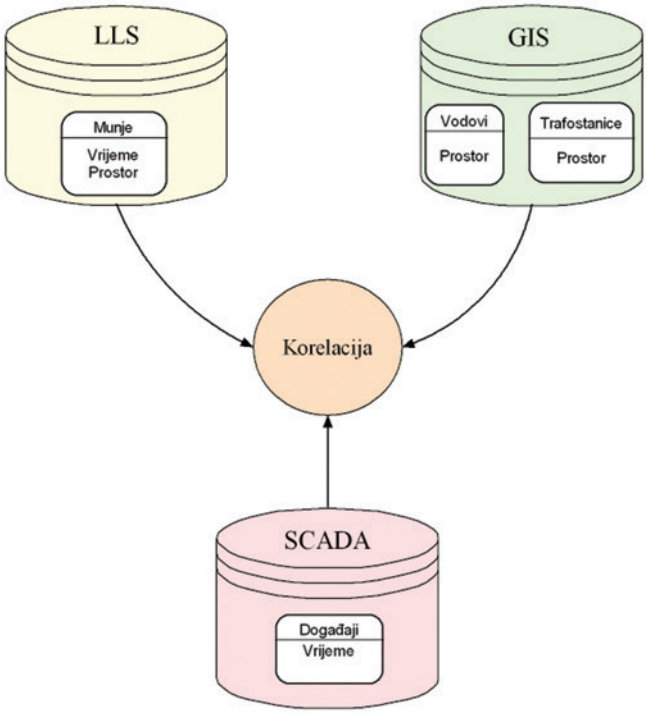
Podatak o objektu EES-a je proslijeđen inačici zamjene geografsko informacijskog sustava (GIS) za potrebe ovog istraživanja pomoću kojeg će se odrediti prostorna geometrija promatranog objekta. Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja, između ostalih, posjeduje podatke o točnom vremenu i točnoj lokaciji pojedinog udara munje.

Objedinjavanjem podataka iz triju navedenih sustava ostvariti će se prostorno-vremenska korelacija između incidenta na objektu elektroenergetskog sustava s udarima munja (Slika 7) [24].

C. Geoprostorni podaci analiziranih nadzemnih SN dalekovoda

Za potrebe koreliranja događaja unutar elektroenergetskog sustava (EES-a) s udarima munja [25-27], podaci iz sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja su se povezali s podacima o događajima u elektroenergetskoj mreži (SCADA sustav) te geoprostornim podacima elektroenergetskih objekata – 14 elektroenergetskih nadzemnih srednjenaponskih distribucijskih 10(20) kV vodova.

Budući da JP ''Elektroprivreda HZ HB'' d.d. Mostar, Distribucija električne energije (DEE) nema implementiran GIS sustav (sustav je u fazi implementacije), podaci o točnim trasama vodova i mikrolokacijama postrojenja bit će dobiveni iz relevantnih podataka geodetskih službi DEE. Mjerodavni podaci su zapisani u obliku Gauss-Krueger (GK) koordinatnog sustava te je sve relevantne točke zapisa trasa bilo potrebno prebaciti u referentni koordinatni sustav WGS84 kojeg podržava predviđeni Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja (LINET).



Slika 7: Objedinjavanje podataka iz triju sustava za prostorno-vremenskukorelaciju između incidenta na objektu EES-a i udara munje

D. Korelacija podataka o udarima munja i događaja u SN mreži

Polazni kriterij za vremensku korelaciju događaja prorade relejne zaštite na promatranim distribucijskim vodovima i udara munje je točno vrijeme nastanka kvara. Zbog preciznosti za potrebe korelacije prorade relejne zaštite na distribucijskim dalekovodima korištena su vremena nastanka kvara prema signalima pobude s relejnog uređaja zabilježenim u listama događaja u arhivi SCADA sustava.

Da bi vremenska korelacija bila moguća, nužna je istovremenost mjerenja sustava za lociranje munja i SCADA sustava.

Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja podatke o udarima munja i pripadajuće parametre preuzima iz sustava LINET, čiji senzori za točno mjerenje vremena koriste GPS sustav mjerenja vremena. Uređaji relejne zaštite promatranih distribucijskih dalekovoda smješteni u pripadajućoj transformatorskoj stanici vremenski su sinkronizirani SCADA sustavom, koja također koristi GPS sustav mjerenja vremena. Deklarirana točnost GPS sustava mjerenja vremena je odgovarajuća, stoga su podaci iz SCADA sustava o vremenu detekcije kvara pogodni za usporedbu s podacima o vremenu udara munja iz Sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja.

Kao osnovni uvjet korelacije određena je razlika vremena između detekcije kvara uređajem relejne zaštite i udara munje od 1 sekunde.

Preduvjet za prostornu korelaciju je poznavanje geoprostornih podataka objekata svih promatranih distribucijskih dalekovoda.

Alarm-zone za prijenosne elektroenergetske vodove (110 kV, 220 kV, 400 kV) uglavnom pretpostavljaju udaljenostioko 500 metara. Zbog nižih naponskih razina izolacije na analiziranim 10(20) kV vodovima (pogon 10 kV, razina izolacije 24 kV) alarm-zona za statističku obradu podataka o udarima munja je povećana i obuhvaća po 2000 metara s obje strane linije SN voda.

Postupak korelacije udara munja i kvarova na promatranim distribucijskim vodovima proveden je uz određena ograničenja te dobiveni rezultati sadrže grešku sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja koja je tehnološko ograničenje za točnost ove metode.

4. PROCJENA VJEROJATNOSTI ISPADA NADZEMNOG DALEKOVODA ZBOG UDARA MUNJE

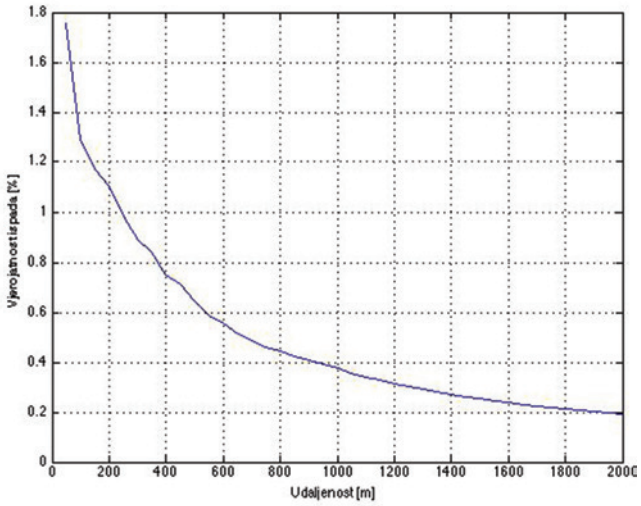
Cilj je razvoj procedure za procjenu vjerojatnosti ispada tipičnog nadzemnog 10(20) kV dalekovoda zbog utjecaja udara munje. Pri tome će se pomoću teorije vjerojatnosti i statistike, a na osnovi trenutnih i historijskih podataka iz sustava za lociranje atmosferskih pražnjena (SLAP) i sustava za daljinski nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka (SCADA), dobiti 3D krivulja kao funkcija distri-

bucije vjerojatnosti ispada (*CDF – Cumulative Distribution Function*) u ovisnosti o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA).

Razvoj sustava koji će omogućiti procjenu vjerojatnosti ispada nadzemnog dalekovoda u promatranom dijelu srednjenponskog sustava uslijed udara munje na temelju raspoloživih podataka, bit će proveden korištenjem programskog sustava Matlab. Matlab (*MATrix LABoratory*) je programski jezik visoke razine i koristi se kao interaktivna okolina za numeričko i matrično računanje te vizualizaciju i programiranje.

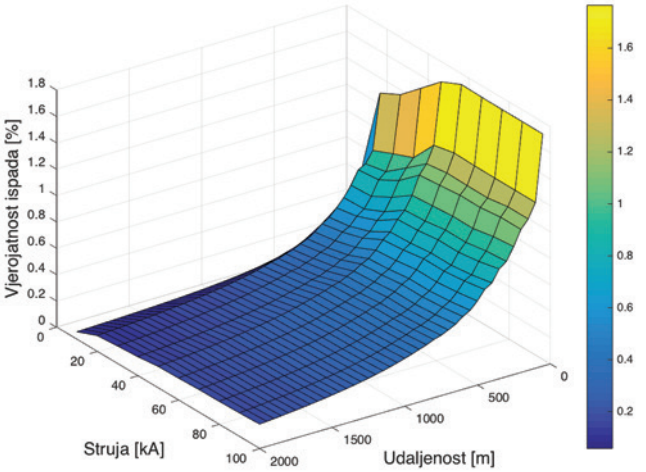
Vrijednosti parametra udaljenosti diskretizirane su na svakih 100 m u rasponu od 0 do 2000 m.

Na osnovi dobivenih podataka o udarima munja iz SLAP-a, vremenski i prostorno koreliranih s podacima iz SCADA sustava o ispadima promatranih vodova zbog udara munje, ukupna vjerojatnost ispada nadzemnog dalekovoda ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) za sve promatrane SN vodove, prikazana je na Slici 8.



Slika 8: Ukupna vjerojatnost ispada nadzemnog dalekovoda ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda za sve promatrane SN vodove

Dodavanjem jakosti struje kao ulaznog promatranog faktora, na osnovi dobivenih podataka o udarima munja iz SLAP-a, vremenski i prostorno koreliranih s podacima iz SCADA sustava o ispadima promatranih vodova zbog udara munje, vjerojatnost ispada nadzemnog dalekovoda ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA) za sve promatrane SN vodove, prikazana je na Slici 9. Vrijednosti parametra udaljenosti diskretizirane su na svakih 100 m u rasponu od 0 do 2000 m, a vrijednosti jakosti struje munje su diskretizirane na svakih 10 kA u rasponu od 0 do 100 kA.



Slika 9: Vjerojatnost ispada nadzemnog dalekovoda zbog udara munje ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA)

5. FUNKCIJA APROKSIMACIJE VJEROJATNOSTI ISPADA NADZEMNOG DALEKOVODA USLIJED UDARA MUNJE

Cilj je odrediti aproksimiranu funkciju distribucije vjerojatnosti ispada za relevantno predviđanje ispada u slučaju budućih udara munje u ovisnosti o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA). U programskom sustavu Matlab koristit će se matematička metodologija regresijske analize *Least Square* [28]-[30]. Cilj je načiniti formulu koja prikazuje, odnosno, predstavlja 3D karakteristiku-funkciju aproksimacije u ovisnosti parametara: vjerojatnost ispada (%), udaljenost r (m), jakost struje i (kA). Sukladno empirijskoj analizi događaja i očekivanim matematičkim doprinosima pojedinih ulaznih parametara, polazni oblik funkcije aproksimacije se određuje prema sljedećem izrazu:

$$\hat{f}(r,i) = \sum_{\substack{p+q\le n \\ p\ge 0 \\ q\ge 0 \\ n\ge 0}} c_{p,q} \cdot \left(\frac{1}{r}\right)^p \cdot i^q$$

gdje je: r – udaljenost mjesta udara munje od najbliže točke linije voda (m); i – jakost struje munje (kA).

Ovakva relacija funkcije aproksimacije je odabrana zbog činjenica da teoretske spoznaje dokazuju da s porastom struje munje raste vjerojatnost ispada elektroenergetskog voda, odnosno, da s porastom udaljenosti mjesta udara munje od linije voda opada vjerojatnost ispada elektroenergetskog voda.

Pogreška aproksimacije se određuje prema sljedećem izrazu:

$$e_k = f_k - \hat{f}(r_k, i_k)$$

Prosječna suma kvadrata pogreške se određuje prema sljedećem izrazu:

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e_k^2$$

gdje je: e-pogreška aproksimacije.

Kako bismo odredili funkciju aproksimacije potrebno je pronaći koeficijente uz koje se pronalazi minimalna greška:

$$c^*_{p,q} = \min_{c_{p,q}} MSE$$

RMSE (*Root Mean Square Error*) je korijen iz sume kvadrata podijeljen s brojem podataka, odnosno, prosječna pogreška po svakom dobivenom rezultatu.

Funkcijom aproksimacije moguće je odrediti aproksimaciju vjerojatnosti udara munje na udaljenosti

$$r_1 \le r \le r_2$$

te za jakosti struje

$$i_1 \le i \le i_2$$

pa slijedi:

$$p\ (\text{ispad} \mid r_1 \le r \le r_2,\ i_1 \le i \le i_2)$$

$$F(r_1, i_2) - F(r_2, i_2) + F(r_2, i_1) - F(r_1, i_1) \ge 0$$

Da bi postigli točniju aproksimaciju, uvodimo više stupnjeva slobode, odnosno, više stupnjeve polinoma, budući da polinom višeg stupnja sadržava sve članove manjih potencija. Za primjer, pokazat će se funkcije aproksimacije izražene polinomima 2. i 5. stupnja.

Na Slikama 10 i 12 prikazane su funkcije aproksimacije izražene polinomom 2. (Slika 10) i 5. (Slika 12) stupnja i funkcija vjerojatnosti ispada (dobivena mjerenjem i korelacijom) nadzemnog dalekovoda ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA).

Na Slikama 11 i 13 prikazane su krivulje grešaka aproksimacije vjerojatnosti ispada za funkcije aproksimacija izražene polinomom 2. (Slika 11) i 5. (Slika 13) stupnja ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA).

Funkcija aproksimacije izražena polinomom 2. stupnja:

$$\hat{f} = -\frac{5{,}3053 \cdot 10^3}{r^2} + \frac{0{,}5029}{r} \cdot i + \frac{146{,}9158}{r} - 5{,}6183 \cdot$$

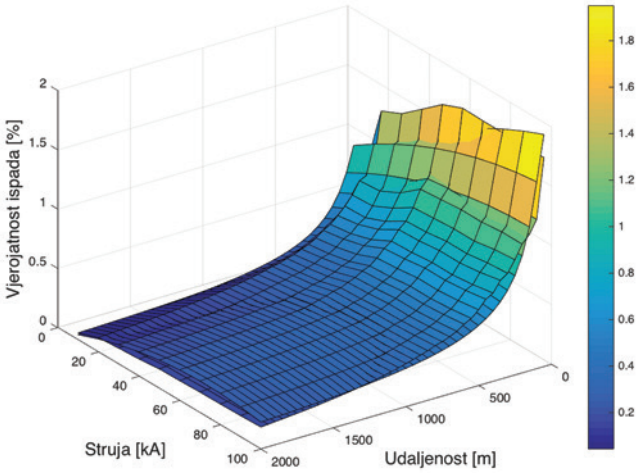
$$\cdot 10^{-5} \cdot i^2 + 0{,}008 \cdot i - 0{,}105$$

RMSE (za funkciju aproksimacije 2. stupnja) = 0,0833

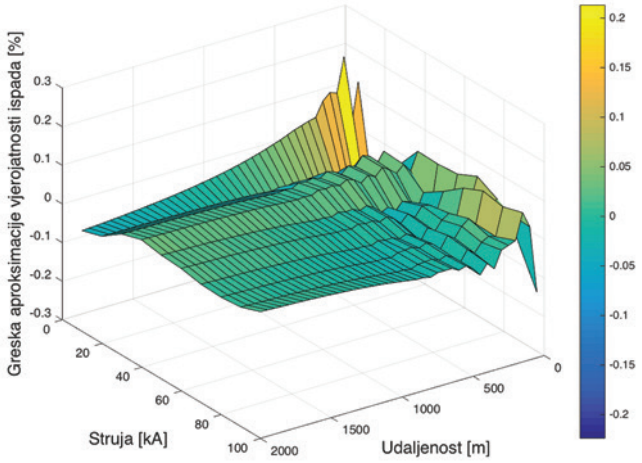
Funkcija aproksimacije izražena polinomom 5. stupnja:

$$\hat{f} = -\frac{6{,}4243 \cdot 10^9}{r^5} - \frac{5 \cdot 10^5}{r^4} \cdot i + \frac{2{,}269 \cdot 10^8}{r^4} - \frac{2 \cdot 10^6}{r^3}$$

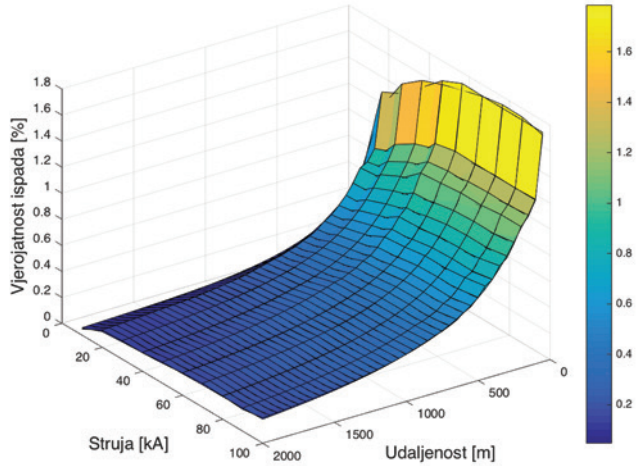
RMSE (za funkciju aproksimacije 5. stupnja) = 0,0192



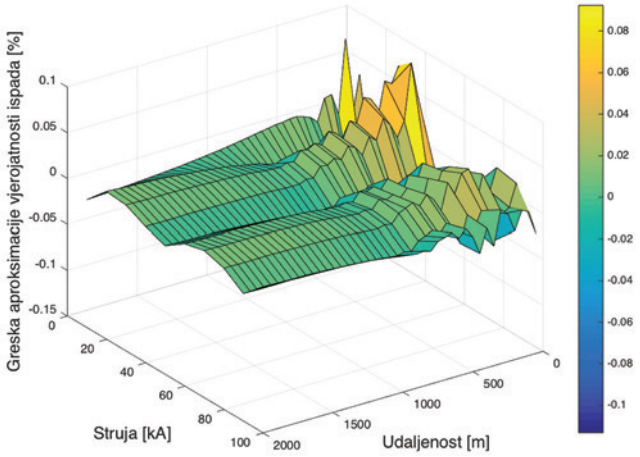
Slika 10: Funkcija aproksimacije izražena polinomom 2. stupnja i funkcija vjerojatnostiispada (dobivena mjerenjem i korelacijom) nadzemnog dalekovoda ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA)



Slika 11: Greška aproksimacije vjerojatnosti ispada za funkciju aproksimacije izraženu polinomom 2. stupnja ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA)



Slika 12: Funkcija aproksimacije izražena polinomom 5. stupnja i funkcija vjerojatnosti ispada (dobivena mjerenjem i korelacijom) nadzemnog dalekovoda ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA)



Slika 13: Greška aproksimacije vjerojatnosti ispada za funkciju aproksimacije izraženu polinomom 5. stupnja ovisno o udaljenosti mjesta udara munje od linije voda (m) i jakosti struje munje (kA)

6. ZAKLJUČAK

Mikrolokacija udara munje, determinirana LLS-om bi se mogla koristiti kao informacija o mjestu kvara na nadzemnom SN vodu, posebice u slučajevima kada funkcija lokacije kvara na sustavu relejne zaštite nije dostupna.

Poznato je da su udari munje najveći uzrok kvarova na nadzemnim vodovima što ima značajan utjecaj na pouzdanost opskrbe kvalitetnom električnom energijom. Korelacijom podataka o atmosferskim pražnjenjima s podacima o događajima u elektroenergetskom sustavu moguće je utjecati na poboljšanje pouzdanosti opskrbe električnom energijom i povećanje kvalitete električne energije.

Istraživanje koje rezultira aproksimiranom funkcijom uvjetne vjerojatnosti ispada tipičnog nadzemnog dalekovoda zbog udara munje u srednjenaponskom elektroenergetskom sustavu pomoći će u određivanju očekivanog broja ispada zbog udara munja pojedinog elektroenergetskog objekta. Na taj način operatori distribucijskog sustava mogu dobiti relevantne podatke o potrebnim tehničkim aktivnostima eventualne ugradnje sustava za sekcioniranje i automatsko rekonfiguriranje mreže srednjeg napona u cilju smanjenja SAIDI i SAIFI indikatora.

LITERATURA

[1] ''Characteristics of Lightning Surges on Distribution Lines", EPRI Project 2542-1 Report TR-100218, 1991.

[2] B. Babić, S. Bojić, Inducirani atmosferski prenaponi na srednjenaponskim nadzemnim vodovima, HRO CIGRÉ, 10. savjetovanje, Cavtat, Hrvatska, 06.-10. studenoga 2011.

[3] Fabio Motola, Methods and Techniques for the Evaluation of Lightning Induced Overvoltages on Power Lines - Application to MV Distribution Systems for Improving the Quality of Power Supply, University Federico II of Napoli - Electrical Engineering Department, PhD in Electrical Engineering, Napoli, Italy, November 2007.

[4] ''IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", IEEE Std. 1410-2011, January 2011.

[5] ''Protection of MV and LV Networks against Lightning", CIGRÉ Working Group C4.4.02, February 2006.

[6] ''Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Location Systems - The Effects of System Performance", CIGRÉ Working Group C4.404, April 2009.

[7] ''Protection of Medium Voltage and Low Voltage Networks against Lightning - Lightning Protection of Medium Voltage Networks", CIGRÉ Working Group C4.402, December 2010.

[8] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, Statistical Method for the Evaluation of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines, IEEE Trans. Dielectr. Electr.Insul., Vol. 20, pp. 202-211, 2013.

[9] A. Piantini, D. M. Duarte, F. Romero, Lightning Overvoltages on Rural Distribution Lines, International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, November 9-13, 2008.

[10] A. M. Busrah, M. Mohamad, The Studies of the Line-Lightning Performance of Unshielded Distribution Lines, International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, Pehang, Malaysia, June 21-22, 2011.

[11] K. Yamabuki, A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, M. Paolone, L. Peretto, R. Tinarelli, M. Bernardi, R. Vitale, A Distributed Measurement System for Correlating Faults to Lightning in Distribution Networks, XVth International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007.

[12] I. Uglešić, V. Milardić, M. Mandić, B. Filipović-Grčić, Praćenjeatmosferskihpražnjenjazapotrebevođenja EES-a, studija, Zagreb, rujan 2007.

[13] B. Franc, M.Šturlan, I. Uglešić, Z. Hebel, Primjena sustava za lociranje munja u vođenju elektroenergetskog sustava, 10. Savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 6.-10. studenoga 2011.

[14] H. D. Betz, K. Schmidt, P. Laroche, P. Blanchet, W. P. Oettinger, E. Defer, Z. Dziewit, J. Konarski, LINET - An International Lightning Detection Network in Europe, 2007.

[15] H. D. Betz, R. Kulzer, A. Gerl, B. Eisert, W. P. Oettinger, D. Jakubassa, On the Correlation between VLF - Atmospherics and Meteorological data, ICLP, Firence, 1996.

[16] H. D. Betz, K. Schmidt, B. Fuchs, W. P. Oettinger, H. Hoeller, Cloud Lightning: Detection and Utilization for Total Lightning Measurement in the VLF/LF Regime, Journal of Lightning Research, August 2007.

[17] H. D. Betz, W. P. Oettinger, P. Schmidt, M. Wirz, Modern Lightning Detection and Implementation of a New Network in Germany, Europe, European Geosciences Union 2005, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 00685, 2005.

[18] H. D. Betz, K. Schmidt, P. Laroche, P. Blanchet, W. P. Oettinger, E. Defer, LINET - A new Lightning Detection Network in Europe, 13th International Conference on Atmospheric Electricity, August 13-18, 2007., Beijing, China.

[19] S. Piliškić, B. Franc, Analiza utjecaja atmosferskih pražnjenja na ispade prijenosnih vodova usporedbom podataka sustava za lociranje munja i podataka relejne zaštite, HRO CIGRÉ, 10. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Opatija, Hrvatska, 11.-14. studenoga 2012.

[20] Projekt izvedenog stanja sustava daljinskog vođenja implementiranog u Direkciji za proizvodnju električne energije JP ''Elektroprivreda HZ HB" d.d. Mostar.

[21] Projekt izvedenog stanja sustava daljinskog vođenja implementiranog u ''Elektroprijenos BiH" d.d. Banja Luka (Operativno područje Mostar, Operativno područje Sarajevo, Operativno područje Banja Luka i Operativno područje Tuzla).

[22] Projekt izvedenog stanja tehničkog sustava Končar ''PROZANET SCADA" instaliranog u tri dispečerska centra u sjedištima Pogona Mostar, Pogona Grude i Pogona Livno, ''KONČAR - Inženjering za energetiku i transport" d.d. Zagreb.

[23] JP Elektroprijenos a.d. Banja Luka - Operativno područje Mostar, Energocontrol d.o.o. Zagreb, Sustav automatizacije trafostanica 110/x kV, 26.11.2005.

[24] I. Uglešić, V. Milardić, B. Franc, B. Filipović-Grčić, J. Horvat, Establishment of a New Lightning Location System in Croatia, CIGRÉ C4 Colloquium on Lightning and Power System, Kuala Lumpur, Malaysia, 16.-19. svibanj 2010.

[25] K. Cummins, E. P. Krider, M. D. Malone, The U.S. National Lightning Detection Network and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities, IEEE Trans. on EMC, Special Issue on Lightning, Vol. 40, Nr. 4, November 1998.

[26] M. Bernardi, C. Giorgi, V. Biscaglia, Medium Voltage Line Faults Correlation with Lightning Events recorded with the Italian LLP system CESI-SIRF, Proc. of the 24th International Conference on Lightning Protection, Birmingham, United Kingdom, 1998.

[27] C. A. Nucci, A. Borghetti, M. Paolone, P. Boselli, M. Bernardi, S. Malgarotti, I. Mastandrea, F. Rachidi, Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines: Theoretical and Experimental Investigation of related Problems and their Impact on Power Quality, CIGRÉ 2004 Session, Paris, France, 29 August - 3 September 2004.

[28] Steven J. Miller, The Method of Least Squares, Brown University, Mathematics Department, Providence RI 02912, 2003.

[29] Michael T. Heath, Scientific Computing - An Introductory Survey, University of Illinois at Urbana Champaign, 1997.

[30] P. K..Trivedi, D. M. Zimmer, Copula Modeling: An Introduction for Practitioners, Foundations and Trends in Econometrics, 2007.

BIOGRAFIJA

Drago Bago diplomirao je 2000. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Na istom je fakultetu upisao poslijediplomski znanstveni studij koji je uspješno završio i magistrirao 2008. godine, a na istom fakultetu završava i poslijediplomski znanstveni doktorski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika.

Završio je stručni studij "Energetske učinkovitosti" u organizaciji Instituta za energetske tehnologije iz Kjellera (Oslo), Kraljevina Norveška i Fakulteta elektrotehnike i računarstva.

Autor je ili koautor više znanstvenih i stručnih članaka iz oblasti prenaponske zaštite srednjenaponskih vodova, korelacije podataka o događajima u elektroenergetskom sustavu i podataka dobivenih iz sustava za lociranje munja, energetske učinkovitosti i oblasti upravljanja, vođenja i nadziranja elektroenergetskog sustava.

Član je međunarodne stručne organizacije IEEE. Predsjednik je Studijskog odbora C6 BH K CIGRÉ - Distribucijski sustavi i male elektrane. Član je Upravnog odbora BH K Međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques - Council on Large Electric Systems*). Član je Upravnog odbora BAKE-a - BH vijeća za elektrotehniku. Član je Hrvatske udruge diplomiranih inženjera AMAC-a.