

Igor Ivanković¹
HOPS d.o.o.
igor.ivankovic@hops.hr

Goran Levačić
HOPS d.o.o.
goran.levacic@hops.hr

Alan Župan
HOPS d.o.o.
alan.zupan@hops.hr

Dean Dobrec
HOPS d.o.o.
dean.dobrec@hops.hr

POGONSKA ISKUSTVA I MOGUĆA POBOLJŠANJA PRI ODRŽAVANJU ODVODNIKA PRENAPONA U VISOKONAPONSKIM POSTROJENJIMA

SAŽETAK

U prvom djelu rada su opisani odvodnici prenapona koji se koriste u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži u svrhu zaštite od atmosferskih i sklopnih prenapona. Opisane su suvremene ispitne metode. U drugom djelu rada prikazani su suvremeni sustavi i alati koji se koriste u svrhu proračuna i analize utjecaja grmljavinskih aktivnosti na području prijenosne mreže RH.

Temeljem podataka iz opisanih sustava, proračunima u programskim alatima EMTP-tima je moguće procijeniti energetske opterećenje odvodnika prenapona. U slučaju indikacija mogućeg energetskog preopterećenja, što je posebno moguće za slučajeve bliskog udara munje, predložen je pristup provjere ispravnosti odvodnika u kraćim vremenskim intervalima od uobičajenog periodičnog ispitivanja.

Ključne riječi: odvodnici prenapona, sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja, SCADA, GIS, EMTP-RV

OPERATIONAL EXPERIENCES AND POSSIBLE IMPROVEMENTS OF SURGE ARRESTER MAINTENANCE IN HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS

ABSTRACT

The first part of the work describes surge arresters that are used in the power transmission network for protection against atmospheric and switching overvoltages. The test methods of surge arresters are described as well. The second part of the paper presents modern systems and tools used for calculation and determination of impact of atmospheric discharges on the area of the Croatian power transmission network.

Based on data from the described systems, with calculations in EMTP-type of software tools is possible to estimate the energy stress of surge arresters. In the case of indications that a given surge arrester is overstressed, which is particularly possible for cases of nearby lightnings, the approach of surge arrester testing is recommended in shorter intervals than the usual periodic test.

Key words: surge arresters, lightning monitoring system, SCADA, GIS, EMTP-RV

¹ Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće/instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća/institucije.

1. UVOD

Odvodnici prenapona su elementi prijenosnog elektroenergetskog sustava koji štite primarnu visokonaponsku opremu na način da ograničavaju prenapone ispod razine podnosivog napona opreme, a da se pri tome energetski ne preoptereće. Da bi mogli učinkovito štiti primarnu opremu, odvodnici prenapona se ponašaju kao nelinearni otpornici čija se vrijednost mijenja u ovisnosti o amplitudi (narinutog) napona. U visokonaponskim prijenosnim sustavima odvodnici prenapona se najčešće nalaze u blizini energetskih transformatora, dalekovodnim poljima ili na dalekovodima (tzv. linijski odvodnici prenapona).

Kada se govori o odvodnicima prenapona, potrebno je istaknuti njihovu energetsku sposobnost, koja se odnosi na energiju koju mogu apsorbirati bez gubitka termičke sposobnosti. Generalno, postoje dvije vrste energetske sposobnosti: energetska sposobnost jednog impulsa i termička energetska sposobnost.

Energetska sposobnost jednog impulsa definira se kao maksimalna energija koju odvodnik može podnijeti u trajanju od 4 ms ili duže, a da pri tom ostane termički stabilan na nazivnom naponu U_n u trajanju od 10 s i trajnom radnom naponu U_c u trajanju 30 min, dok se termička energetska sposobnost definira kao maksimalna energija pri kojoj se odvodnik može ohladiti na normalnu pogonsku temperaturu. Navedene energetske sposobnosti nisu eksplicitno prikazane u međunarodnoj normi za odvodnike prenapona. Umjesto toga definirana je energetska klasa odvodnika. Da bi odvodnici prenapona mogli nesmetano obavljati svoju funkciju moraju biti ispravni, što se dokazuje njihovim ispitivanjem, te se moraju redovno održavati.

U radu je dan osvrt na raspoložive alate i sustave kojima raspolaže HOPS, a koji mogu doprinijeti promjeni pristupa održavanja odvodnika prenapona u prijenosnoj mreži, posebice na temelju raspoloživih podataka iz SCADA sustava (statistika isklopa prekidača uzrokovanih djelovanjem atmosferskih prenapona). Uz navedeno, na praktičnom primjeru je prikazan proračun iznosa opterećenja odvodnika prenapona na modelu tipskog nadzemnog voda i transformatorske stanica u programskom alatu EMTP-RV. Simulacije su rađene na temelju statistike stvarnih ulaznih parametara i amplituda struja munje iz SLAP sustava. S obzirom na navedeno, predložen je širi pristup problematici ispitivanja odvodnika prenapona, koji na temelju dostupnih podataka te pogonskih iskustava može doprinijeti njihovom održavanju, odnosno sprečavanju termičkog preopterećenja. U skladu time, dane su preporuke vezane za moguće poboljšanje u njihovom održavanju i dijagnostici.

2. VISOKONAPONSKI ODVDONICI PRENAPONA

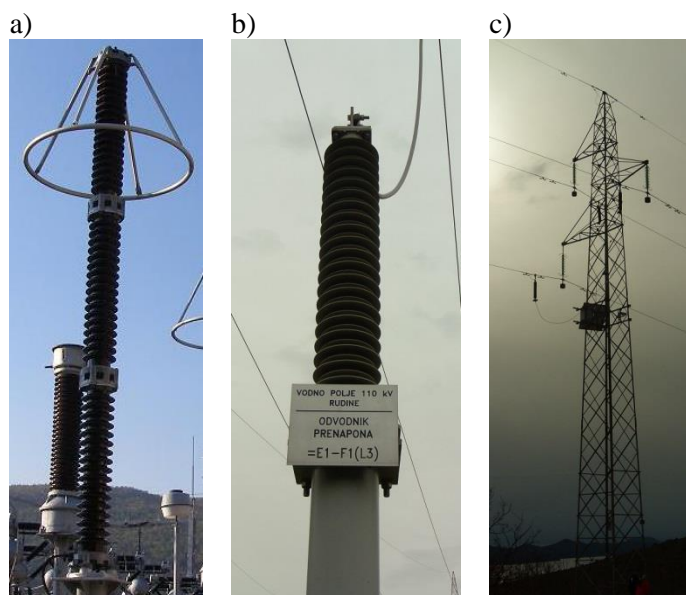
Odvodnici prenapona (engl. surge arresters) su uređaji čija je osnovna svrha zaštite VN opreme od sklopnih i atmosferskih prenapona [1]. VN opremu štite na način da učinkovito ograničavaju spomenute prenapone ispod razine podnosivog napona opreme, a da se pri tome energetski ne preoptereće. Mogu biti smješteni u postrojenju u blizini energetskih transformatora i u dalekovodnim poljima ili na dalekovodima (engl. line surge arresters).

Općenito, odvodnici prenapona su spojeni paralelno sa opremom koju štite, kako bi „preusmjerili“ struju koja se javlja prilikom prenapona. Aktivni elementi (ZnO-blokovi) odvodnika prenapona proizvode se korištenjem materijala s jako izraženom nelinearnom karakteristikom otpora, te se u najvećoj mjeri sastoje od cink-oksida, uz dodatak drugih oksida metala [2].

Izuzetno zahtjevna kontrola kvalitete te brojna testiranja koja se provode u svim stupnjevima proizvodnje, od ispitivanja sirovina pa do gotovog proizvoda, garancija su kvalitetne primjene odvodnika prenapona u svim uvjetima pojave prenapona. Različite dimenzije omogućavaju širok izbor standardnih odvodnika jednako kao i različite zahtjeve kupaca za nestandardnim zaštitnim razinama i energijama odvođenja. Osnovna podjela odvodnika prenapona u VN postrojenjima je na „klasične“ odvodnike (s iskrištem), i metalooksidne odvodnike (bez iskrišta) [3].

"Klasični" / ventilni odvodnik prenapona s iskrištem se i danas susreće u postrojenjima, iako se u nova postrojenja ugrađuju samo metal-oksidni odvodnici. Klasični odvodnik prenapona sastoji se od serijski povezanih otpornika izrađenih od silicium karbida (SiC odvodnici), te iskrišta. Čestice silicium karbida nalaze se u izolacionom materijalu od kojeg je sastavljen otpornik odvodnika. Kada se na takav materijal narine visoki napon, stvara se između SiC čestica jako električno polje, pri čemu se prostor između njih ionizira i postaje vodljiv. Uz veći napon jače je i polje, kao i ionizacija, koja omogućuje stvaranje

vodljivih kanala, tako da vrijednost otpora pada. Pri smanjenom naponu slabi električno polje, a time i ionizacija oko SiC čestica, pa se smanjuju i vodljivi kanali, što djeluje na porast otpora odvodnika. Proradni napon je napon pri kojem proraduju iskrišta odvodnika prenapona. Prema okvirnoj procjeni, u postrojenjima HOPS-a je još uvijek ugrađeno oko 10-15 % klasičnih odvodnika prenapona.



Sl. 1.: Odvodnici prenapona u trafostanicama HOPS-a: a) klasični odvodnik prenapona, b) MO odvodnik prenapona, c) odvodnik prenapona na dalekovodu

Metal oksidni (MO) ili cink oksidovi (ZnO) odvodnici prenapona predstavljaju noviju tehnologiju, te se danas ugrađuju u postrojenja, gdje im je glavna funkcija zaštita transformatora i ostale skupe opreme od atmosferskih i sklopnih prenapona [1], [2]. Imaju izrazito nelinearnu strujno-naponsku karakteristiku. Čestice ZnO su vodljive i međusobno serijski i paralelno vezane.

Treba spomenuti da je struja propuštanja u prvom području pretežno kapacitivna, što se može vidjeti iz posebno nacrtane strujno-naponske karakteristike samo za kapacitivnu struju. Način rada odvodnika koji se sastoji od serijski spojenih otpornika (bez iskrišta) vrlo je jednostavan. Pri nailasku prenapona, struja kroz odvodnik se kontinuirano povećava uz blage promjene napona. S prolaskom prenapona smanjuje se i struja kroz odvodnik, tako da nema popratne struje kao kod klasičnih odvodnika, a zbog nepostojanja iskrišta nema niti nagle promjene napona, koja je za SiC odvodnike uzrokovana proradom iskrišta.

Za MO odvodnike se nazivni napon odvodnika U_n približno odabire kao $U_n = 1.25U_c$, pri čemu je U_c trajni radni napon odvodnika (maksimalna vrijednost). Trajni radni napon odabire se na osnovi termičkog opterećenja odvodnika, tj. trajanja privremenih prenapona na mjestu ugradnje odvodnika. Privremeni prenaponi su povišenja napona pogonske frekvencije ograničenog trajanja.

Linijski odvodnici prenapona koriste se u svrhu ublažavanja posljedica atmosferskih pražnjenja odnosno poboljšanja preskočnih karakteristika dalekovoda.

Odvodnici prenapona koji su pod stalnim pogonskim naponom, izloženi su kombiniranom naprezanja od strane mreže i od samog postrojenja. Stalna izloženost naprezanju uzrokuje starenje i moguće oštećenje odvodnika. To se odnosi na moguće oštećenje izolacije i narušavanje zaštitnih karakteristika odvodnika. Najveći „neprijatelji“ odvodnika prenapona su prodor vode (vlaga), površinsko zagađenje i absorbirana toplina. Na degradaciju odvodnika prenapona među ostalim utječu i ostali čimbenici, kao što su: gubitak brtvljenja koje uzrokuje prodor vlage, pražnjenja po površini odvodnika uslijed površinskog zagađenja posolicom ili nekim drugim vodljivim aerosolima (kao posljedica nastanak površinskih puznih struja), dugoročno starenje odvodnika pri normalnom pogonskom naponu, unutarnja parcijalna izbijanja, te od posebnog interesa za ovaj rad, možebitna energetska preopterećenja kod privremenih i tranzijentnih prenapona.

3. METODE ISPITIVANJA ODVODNIKA PRENAPONA

Od suvremenih metoda koje se najviše primjenjuju u „terenskom“ ispitivanju odvodnika prenapona danas su: ispitivanje odvodnika prenapona utvrđivanjem strujno-naponske karakteristike, odnosno ispitivanje VN ispitnom stanicom (moguće ispitivanje klasičnih i MO odvodnika) te ispitivanje odvodnika prenapona sa jednim od uređaja za mjerenje radne komponente struje odvođenja, što je i češća praksa s obzirom da su većina ugrađenih odvodnika prenapona u postrojenjima HOPS-a metaloksidni odvodnici (MO) [3].

Ispitivanje klasičnih odvodnika se provodi prema standardu IEC 60099-1 [4]. Odvodnik koji se ispituje mora se odspojiti od pogonskog napona, te se na gornji dio ispitivanog odvodnika priključi regulirani izmjenični napon frekvencije 50 Hz. Napon se podiže do prorade iskrišta odvodnika. Napon prorade je tjemena vrijednost ispitnog napona podijeljena s 2, narinutog na odvodnik prenapona pri kojem na svim iskrištima odvodnika nastane preskok (napon prorade mjeri se 5 puta u intervalima ne kraćim od 10 sekundi, te se bilježe rezultati). Donja granica proradnog izmjeničnog napona određena je standardom IEC 60099-1, prema kojem se odvodnik prenapona proglašava neispravan, ako je proradni napon manji od $1,5 U_n$ ili manji od donje propisane granične vrijednosti proizvođača. Ako je izmjenični proradni napon između $1,5-2,1U_n$, odvodnik je ispravan. Gornja granična vrijednost nije definirana, već je određena iskustveno na temelju istraživanja odvodnika prenapona prema vrijednostima proradnog napona, preporučenih od proizvođača. U slučaju da je izmjenični proradni napon između $2,1-2,4U_n$, preporuča se detaljnije ispitati odvodnik prenapona u VN laboratoriju, gdje je moguće provesti potpunu kontrolu svih zaštitnih karakteristika klasičnih odvodnika. U slučaju da je izmjenični proradni napon veći od $2,4U_n$, odvodnik se proglašava neispravnim i potrebna je zamjena.

Suvremeni MO odvodnici prenapona bez iskrišta ne zahtijevaju posebno održavanje, osim povremenog površinskog čišćenja i eventualne zamjene vijčanih spojeva prema potrebi. Preporuča se provjera njihovog stanja svakih 3-5 godina, snimanjem U-I karakteristike odvodnika, pri čemu se provjerava iznos referentnog napona za propisanu referentnu struju. Osnovna prednost MO odvodnika prenapona u odnosu na SiC je što nemaju iskrište i imaju znatno povoljniji oblik strujno-naponske karakteristike otpornika. Ispitivanje MO odvodnika prenapona s VN ispitnom stanicom, provodi se prema standardu IEC 60099-4/2004 te prema preporukama proizvođača [4]. Ispitivanje se provodi na slični način kao i za klasične odvodnike. Ispitivani odvodnik se isključi iz pogona, donji kraj odvodnika se uzemlji, uz shunt koji služi za mjerenje struje, te se na gornji kraj odvodnika narine izmjenični napon 50 Hz koji se podiže sve dok kroz odvodnik ne proteče od proizvođača propisana referentna struja. U svrhu što točnijeg određivanja referentnog napona i struje, provodi se detaljno snimanje U-I karakteristike odvodnika mjerenjem napona i struje u više točaka te dodatnom numeričkom analizom snimljenih podataka na računalu. MO odvodnici koji imaju referentni napon veći ili jednak od nazivnoga smatraju se ispravnim.

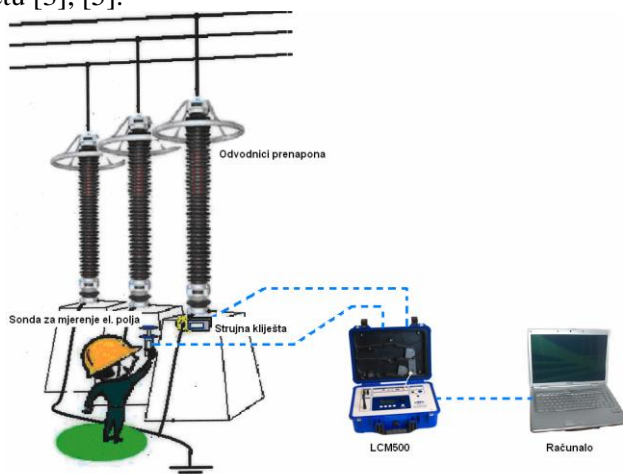
U današnje vrijeme, sve češća i jednostavnija metoda ispitivanja MO odvodnika prenapona je s uređajima za mjerenje radne komponente struje odvođenja. Ova metoda sadrži niz prednosti u odnosu na ranije navedenu metodu. Mogu se ispitivati sve vrste MO odvodnika prenapona. Jedan od takvih dijagnostičkih alata jest i LCM uređaj (engl. Leakage current monitor). LCM uređaj je prijenosni instrument za mjerenje radne komponente 3. harmonika struje odvođenja MO odvodnika [5]. Jedna od osnovnih prednosti ove metode, na prethodnu je to da se odvodnici mogu ispitivati u pogonu, pod naponom [3].

Primjerice, jedan od takvih uređaja jest i LCM500, koji se sastoji od sljedećih komponenti:

- bežične sonde za mjerenje el. polja s antenskim diskovima koja kupi treći harmonik kapacitivne komponente struje, uzrokovane harmonicima napona mreže (FP500)
- bežične strujne sonde (strujni transformator) (CCT500), koja mjeri ukupnu struju odvođenja koja kroz odvodnik ide u zemlju,
- uređaja s antenom, na koji se šalju podaci sa mjernih sondi, te na temelju harmoničke analize određuje radna komponenta struje odvođenja.

S navedenim mjernim uređajem, moguće je izvoditi periodična ispitivanja u svrhu regularne provjere ispravnosti odvodnika u postrojenju (ispitivanja koja su preporučena svakih 3-5 godina) ili kontinuirano praćenje stanja pojedinog odvodnika u pogonu (duži ili kraći period). Također se može koristiti za mjerenje na metalnom kućištu odvodnika prenapona u plinom izoliranim postrojenjima (GIS). Ispitivanje se provodi prema standardu IEC 60099-5 tako da se mjeri struja koja teče kroz odvodnik pri normalnom pogonskom naponu, tzv. struja odvođenja [4]. Ukupna struja odvođenja se sastoji od

kapacitivne i radne komponente. Ukupnom strujom odvođenja dominira kapacitivna komponenta struje, čiji iznos ovisi o kapacitetu [3], [5].



Sl. 2.: Princip ispitivanja odvodnika prenapona pod naponom sa LCM500 mjernim uređajem

Princip ispitivanja prikazan je na slici 2. LCM mjerni uređaj preko antene prikuplja podatke sa sonde, provodi harmoničku analizu i korigira ih, te prikazuje sljedeće rezultate mjerenja: ukupnu struju odvođenja, radnu komponentu struju odvođenja, korigiranu radnu komponentu struju odvođenja i postotak trećeg harmonika. Kriterij po kojemu se određuje ispravnost MO odvodnika ispitivanih s LCM mjernim uređajem su preporuke proizvođača, (ABB, SIEMENS itd.) prema [1], [2], [3]. Pritom se misli na maksimalne vrijednosti radne komponente struje za različite tipove odvodnika pri temperaturi od 20 °C i različitim vrijednostima radnog napona.

4. SUSTAVI KOJI SE KORISTE ZA ANALIZU UTJECAJA GRMLJAVINSKIH AKTIVNOSTI

U ovom poglavlju dan je kratki pregled sustava koji se koriste u HOPS-u za analizu utjecaja grmljavinskih aktivnosti na području prijenosne mreže Republike Hrvatske, te na događaje u prijenosnoj mreži uzrokovane grmljavinskom aktivnošću [6], [7], [8]. U tu svrhu izrađuje se i statistika udara munja u vodove prijenosne mreže RH. Promatranu mrežu čine vodovi (nadzemni vodovi, kabelski vodovi, nadzemno-kabelski vodovi) nazivnih napona 400 kV, 220 kV i 110 kV. Treba napomenuti da transformatorske stanice, elektrane, rasklopna i druga postrojenja te vodovi nazivnog napona ispod 110 kV koji su u nadležnosti HOPS-a nisu promatrani u okviru ove statistike, ali mogu također biti analizirani.

SCADA

SCADA (engl. Supervisory Control And Data Acquisition) predstavlja računalni sustav za nadzor, mjerenje i upravljanje industrijskim sustavima. SCADA sustavi se koriste za sakupljanje podataka i omogućuje ostvarivanje kontrole uređaja ili strojeva na udaljenim mjestima. U HOPS-u se sustav SCADA primjenjuje za potrebe vođenja elektroenergetskih objekata. Ukratko, takav sustav sadrži osnovne parametre svih mrežnih komponenti koje se mogu koristiti kao izvor podataka za ostale sustave i aplikacije [7]. SCADA sadrži zapis odnosno listu događaja (UDW baza podataka) iz koje se preuzimaju e podaci vezani uz proradu zaštite te signali poticaja zaštitnih releja te signali isklopa prekidača u vodnim poljima.

GIS

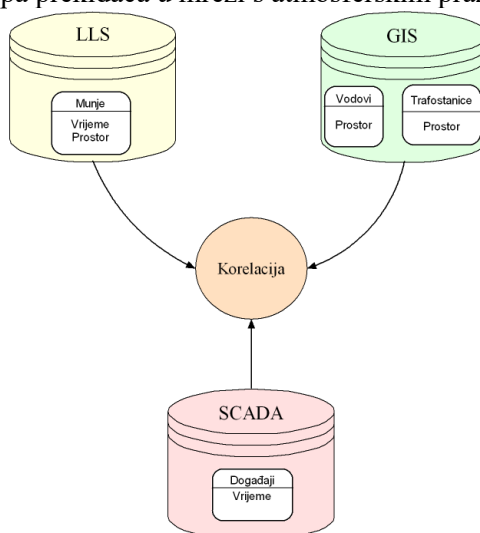
Geografski informacijski sustav (GIS) je sustav za upravljanje prostornim podacima i osobinama pridruženih njima, sposoban za integriranje, spremanje, uređivanje, analiziranje i prikazivanje geografskih informacija. Tehnologija geografskog informacijskog sustava može se koristiti za različite svrhe, kao što su: znanstvena istraživanja, upravljanje resursima, imovinsko upravljanje, planiranje razvoja, kartografiju i planiranje puta. Svaka varijabla koja se može prostorno smjestiti može se pohraniti u GIS-u. U HOPS-u se primjenjuje za označavanje objekata elektroenergetskog sustava (EES), vodova i postrojenja. GIS podaci su uneseni u SLAP u prosincu 2012. godine, te ažurirani s trenutnim stanjem tokom 2017. Implementacijom povezivanja i preuzimanja mrežnog stanja iz SCADA sustava, automatski se ažurira i relacija između GIS

podataka prijenosnih vodova i vodnih polja (veza na podatke zaštitnih releja i prekidača). GIS podaci u SLAP-u predstavljaju sadrže sljedeće geografske podatke objekata EES-a: vodovi (nadzemni, kabelski) i postrojenja (transformatorske stanice, kabelske kućice, elektrane itd.). Geoprostorni podaci su u uređeni u 2017. godini te je tokom cijele 2018. godine SLAP raspolagao ažurnim geoprostornim podacima, što osigurava efikasno provođenje korelacije između atmosferskih pražnjenja i isklopa prekidača u mreži.

SLAP

Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja (SLAP) predstavlja moderno sredstvo za praćenje atmosferskih pražnjenja te analizu utjecaja na različite sustave, kao što je primjerice telekomunikacijska, distribucijska, prijenosna mreža itd. Sustavi za lociranje atmosferskih pražnjenja pružaju informaciju o vremenu, lokaciji i intenzitetu udara munje u stvarnom vremenu. Navedeni podaci mogu korelirati s podacima o ispadima i kvarovima u mreži (slika 3), što može doprinijeti kvaliteti praćenja pogona mreže, otkrivanju uzroka i lokacije nastalih kvarova te skraćivanju potrebnog vremena otklanjanju kvarova te ponovnoj uspostavi rada sustava [6], [8].

U HOPS-u je SLAP svoju primjenu pronašao u vođenju prijenosne mreže, posebno u korelaciji ispada i kvarova u mreži s pojavama atmosferskih pražnjenja, davanju mogućih upozorenja dispečerima o nailasku grmljavinskih nevremena, otkrivanju uzroka kvara itd. Sustav za lociranje atmosferskih pražnjenja je implementiran u funkcije vođenja prijenosnog elektroenergetskog sustava krajem 2012. godine, te provodi korelaciju između isklopa prekidača u mreži s atmosferskim pražnjenjima.

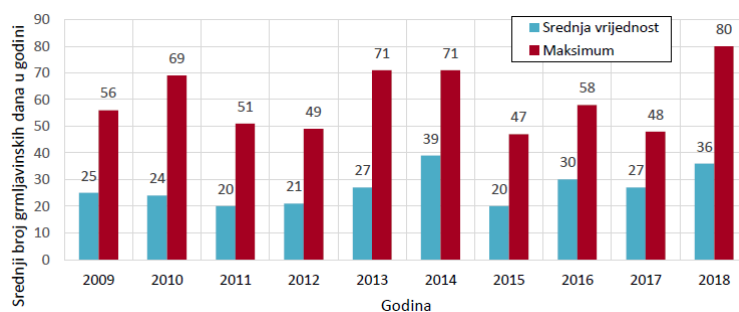


Sl. 3.: Shema korelacije LLS-a, GIS-a i SCADA sustava

S početkom 2017. godine ostvarena je veza između SLAP-a i SCADA sustava koja osigurava dohvat aktualnog mrežnog modela. Odnosno, implementirana je funkcionalnost preuzimanja aktualnog mrežnog modela u SLAP, što osigurava preuzimanje aktualnih relacija dalekovod - vodno polje - prekidač te relacija signala prekidača i signala pripadajuće relejne zaštite na zahtjev.

SLAP korelator promatra sve registrirane isklope prekidača na prijenosnim vodovima te identificira isklope uzrokovane udarima munja uz mogućnost određivanja mjesta kvara. Nadalje, ti podaci se statistički obrađuju te prikazuju ukupan broj registriranih isklopa prekidača u mreži, broj isklopa uslijed udara munja po vodovima i vodnim poljima te prostorno-statističke analize broja grmljavinskih dana i gustoće udara munja u koridorima prijenosnih vodova širine 1000 m od voda [9].

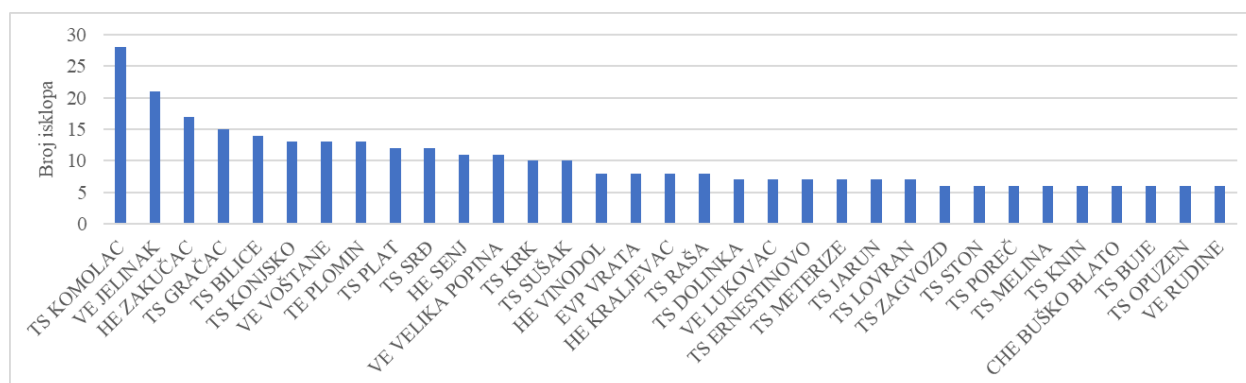
Trend grmljavinskih dana kroz zadnjih 10ak godina prikazan je na slici 4, iz čega se može vidjeti da je 2018. godina imala nadprosječnu grmljavinsku aktivnost, što je razvidno po području s najvećim brojem grmljavinskih dana u Hrvatskoj u pojedinoj godini (2018. godina – 80 dana), ali i po srednjoj vrijednosti za sva područja (2018. godina – 36 dana) [10].



Sl. 4.: Trend grmljavinskih dana po godinama

U 2018. godini zabilježeno je 688 isklopa prekidača na prijenosnim vodovima uzrokovanih od strane 1.415 atmosferskih pražnjenja [10]. Od toga 6 u 400 kV mreži, 78 u 220 kV mreži i 604 u 110 kV mreži. Srednja amplituda struja munja koje su izazvale isklupe prekidača je 31,2 kA, minimalna amplituda struje je 1,6 kA, a maksimalna je 261,9 kA. Prijenosna područja s najviše isklopa prekidača izazvanih udarima munja u 2018. bila su PrP Split i PrP Rijeka. U PrP Rijeka je zabilježeno 283 isklopa uslijed udara munja, odnosno 12,58 [isklop / 100 km mreže], a najviše je zabilježeno u PrP Split, 379 isklopa uslijed udara munja, odnosno 19,62 [isklop / 100 km mreže].

Na temelju statistike iz SLAP-a [9], [10], odnosno broju isklopa prekidača na obje strane dalekovoda uslijed bliskog udara munje od TS (3 km), moguće je prikazati rang listu TS u kojima su odvodnici prenapona, prvenstveno oni u vodnim poljima bili pod pojačanim energetske naprežanjem u pogledu absorbirane energije izazvane djelovanjem munja. Na slici 5 prikazan je poredak TS-ova koje su bile pod povećanim utjecajem bliskih udara munja u periodu od 2016.-2018 [9], [10].



Sl. 5.: Poredak TS-ova sa najviše bliskih udara munja u periodu od 2016.-2018.

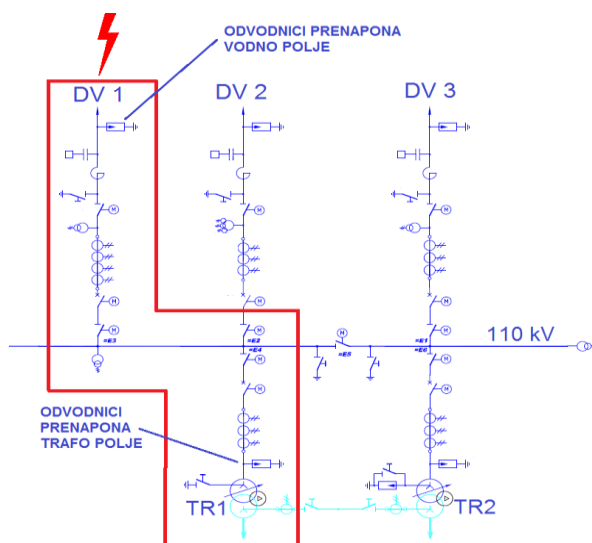
S obzirom na povećanu grmljavinsku aktivnost i njihovo djelovanje na prijenosne vodove, povećana je i mogućnost prorade odvodnika odnosno energetskog opterećenja u vodnim poljima prijenosnih vodova izloženih udarim munja. Posebno se to odnosi na bliske udare, odnosno na udare munja u prijenosne vodove blizu trafostanica, što je prikazano na primjeru u sljedećem poglavlju.

5. UTJECAJ ATMOSFERSKIH PRAŽNJENJA NA ODVODNIKE PRENAPONA

U ovom poglavlju prikazan je primjer određivanja energetskog opterećenja odvodnika prenapona smještenih u 110 kV trafostanici, s naglaskom na djelovanje atmosferskih prenapona u slučaju bliskog udara (u krugu 3 km od TS). Općenito, udar munje može uzrokovati kvar na prijenosu vodu ili opremi smještenoj u trafostanici. Na dalekovodima HOPS-a uobičajena prenaponska zaštita dalekovoda sastoji se od zaštitnog uža i uzemljivača stupa. Osim toga, na nekim dalekovodima instalirani su i linijski odvodnici prenapona, koji smanjuju broja preskoka na izolatorskim lancima, poboljšavaju prenaponsku zaštitu transformatorskih stanica, smanjuju utjecaj sklopnih prenapona itd.

Ali, čak i uz gore navedenu zaštitu prijenosnih vodova, atmosferski prenaponi mogu uzrokovati oštećenja opreme u trafostanici. Zbog toga se primjenjuju odvodnici prenapona u trafostanicama, koji se smještaju u vodna i trafo polja, sa svrhom šticećenja opreme od sklopnih i atmosferskih prenapona [11]. Na

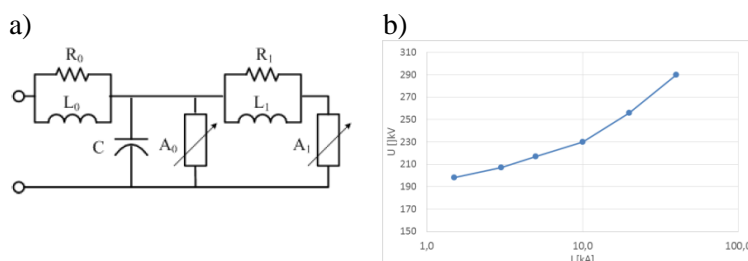
slici 6, prikazana je jednopolna shema tipske 110 kV trafostanice, sa priključenim prijenosnim vodom na kojem su analizirana atmosferska pražnjenja.



Sl. 6.: Jednopolna shema 110 kV trafostanice s prikazom odvodnika prenapona u vodnom i trafo polju

Radi izračuna absorbirane energije odvodnika, 110 kV prijenosni vod sa jednim zaštitnim užetom, i dio 110 kV trafostanice (sa po jednim vodnim i trafo poljem) su modelirani u programskom alatu ETMP-RV, koji spada u grupu alata koji se koriste za proračune/simulacije elektromagnetskih prijelaznih pojava [12].

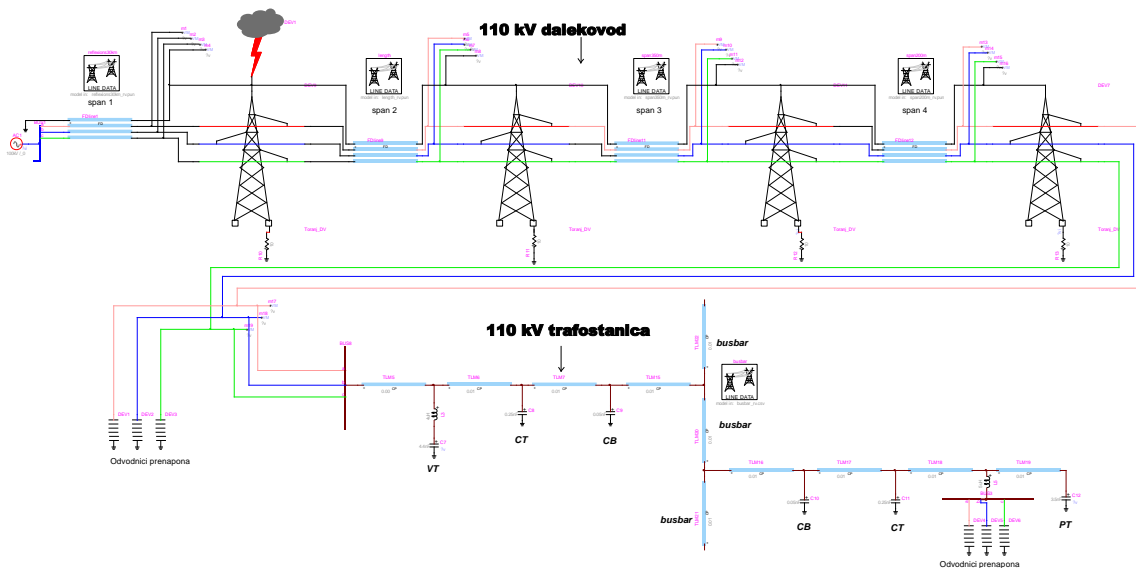
Odvodnik prenapona modeliran je prema modelu predloženom od strane IEEE WG 3.4.11 grupe, koji uključuje nelinearne otpornike A_0 i A_1 , odvojeni niskopropusnim filterom, kako je prikazano na slici 7a. Za potrebe proračuna odabrani su odvodnici prenapona sljedećih karakteristika: $U_n=96 \text{ kV}_{\text{rms}}$, $\text{MCOV}=76 \text{ kV}$, IEC klasa 3, ($w_f=3,9 \text{ kJ/kV}(U_n)$), $I_n=10 \text{ kA}$, sa nelinearnom karakteristikom prema slici 7b [11], [12].



Sl. 7.: a) IEEE frekvencijski ovisni model odvodnika prenapona, b) nelinearna U-I karakteristika odvodnika prenapona $U_n=96 \text{ kV}_{\text{rms}}$ (strujni impuls 8/20 μs)

Dalekovodi su modelirani kao frekvencijski ovisni (tzv. frequency dependent line model), pri čemu je samo nekoliko raspona predmetnog voda modelirano u detalje. Radi točnog prikaza, stupovi dalekovoda modelirani su sa valnim impedancijama (tzv. constant parameter line model), otporom uzemljenja stupa, razmakom između faza i vrha stupa, izolatori sa iskrištima itd. Pretpostavljeno je da analizirani DV nema odvodnike prenapona na dalekovodu.

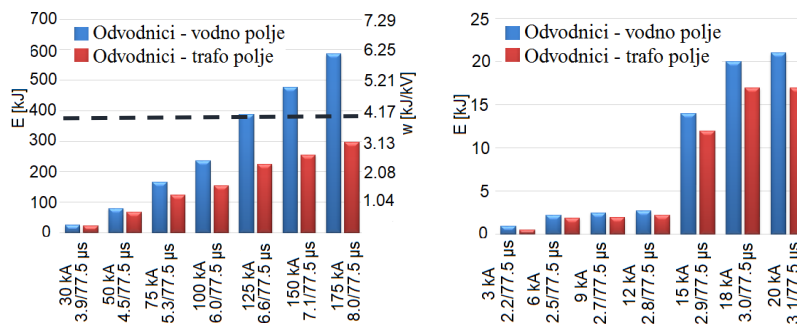
Ostala oprema u promatranoj TS je modelirana kao nadomjesni kapaciteti prema zemlji (naponski i strujni mjerni transformatori, prekidači itd.). Munja je modelirana kao strujni izvor (CIGRE concave lightning current source), pri čemu je moguća promjena sljedećih parametara: strmina, amplituda, trajanje čela i hrbta.



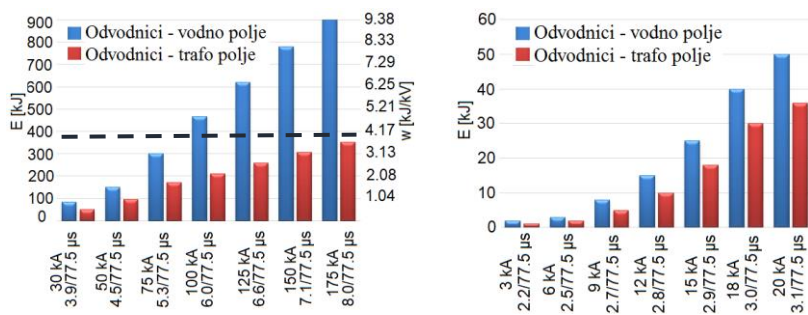
Sl. 7.: EMTP-RV model 110 kV dalekovoda i trafostanice za analizu udara munje i procjene njenog utjecaja na odvodnike prenapona u vodnom i trafo polju

S obzirom da su u slici 5 prikazane TS koje su pod najvećim utjecajem atmosferskih pražnjenja po godinama (prema podacima o isklopu prekidača), vidljivo je da se u većini slučajeva radi o TS smještenim u područjima s višim otporima tla. Sukladno tome, u primjeru proračuna pretpostavljen je otpor tla od 60 Ω [12].

Poznato je da bliski udari munje mogu prouzročiti povećano energetske naprezanje opreme, stoga su primjerom analizirani sljedeći slučajevi bliskog udara u dalekovod: udar munje u fazni vodič i zaštitno uže na 3 km i na cca 300 m od TS (1. stup do TS). Radi pojednostavljenja analizirani su samo jednostruki udari munje. Na slikama 9 i 10 prikazani su rezultati proračuna energetske opterećenja, odnosno absorbirane energije odvodnika prenapona smještenim u vodnom i trafo polju za karakteristični oblik munje s različitim amplitudama. Simulirani su udari malih amplituda (u fazni vodič) u rasponu od 3 do 20 kA, te udari u zaštitno uže u rasponu od 30 do 175 kA.



Sl. 8.: Absorbirana energija odvodnika prenapona smještenim u vodnom i trafo polju za slučaj udara munje u dalekovod na udaljenosti 3km od TS



Sl. 9.: Absorbirana energija odvodnika prenapona smještenim u vodnom i trafo polju za slučaj udara munje u dalekovod na udaljenosti 300 m od TS

DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Ovodnici prenapona štite VN opremu od sklopnih i atmosferskih prenapona, na način da ih ograničavaju ispod razine podnosivog napona opreme, a da se pri tome energetski ne preoptereće. U radu su prikazane suvremene metode ispitivanja odvodnika prenapona, koji se obično ispituju periodično nakon svakih 3 ili 5 godina. Osim toga, prikazani su suvremeni sustavi koji se koriste u HOPS-u za analizu utjecaja grmljavinskih aktivnosti na području prijenosne mreže RH. SLAP sustav se koristi u vođenju prijenosne mreže za korelaciju ispada i kvarova u mreži s pojavama atmosferskih pražnjenja. Još jedna mogućnost korištenja spomenutog sustava, temeljem broja isklopa prekidača jest rangiranje TS u kojima su odvodnici prenapona, prvenstveno oni u vodnim poljima pod pojačanim energetskim naprezanjem u pogledu absorbirane energije izazvane djelovanjem munja u određenom vremenskom periodu (na mjesečnoj/kvartalnoj/godišnjoj bazi).

Poznato je da bliski udari munje mogu prouzročiti povećano energetsko naprezanje opreme, pa tako i odvodnika prenapona. Na temelju podataka iz SCADE, GIS-a i SLAP-a moguće je izdvojiti bliske udare munja, odrediti lokaciju udara na dalekovodu, te amplitudu munje. Ti podaci se nadalje mogu koristiti za simulacije u programskim alatima (EMTP-tipa) za određivanje energetskog opterećenja odvodnika. Na primjeru proračuna u radu (slika 8 i 9) je prikazan slučaj energetskog preopterećenja odvodnika za slučaj bliskih udara munje određene amplitude i strmine.

Ukoliko se analizom utvrdi da su odvodnici prenapona u određenim TS pod povećanim energetskim naprezanjem u određenom vremenskom periodu, to može biti signal za dodatnu provjeru njihove ispravnosti, primjerice MO odvodnike prenapona moguće je ispitati pod naponom sa LCM500 mjernim uređajem.

U skladu s navedenim, u radu je razmotrena mogućnost uvođenja tzv. „health indeksa“ odvodnika prenapona na temelju dostupnih sustava i programskih alata.

LITERATURA

- [1] ABB AB - High Voltage Products - Surge Arresters: High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide, Ludvika, 2018.
- [2] SIEMENS AG: High-voltage surge arresters Product guide, 2014.
- [3] G. Levačić, S. Bojić, B. Milešević: Metode ispitivanja klasičnih i metaloksidnih odvodnika prenapona, 10. savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 2011.
- [4] International standards IEC 60099-1,60099-4,60099-5
- [5] LCM500 Leakage Current Monitor User Guide, Doble Transinor AS
- [6] B. Franc, I. Uglešić, K. Mesić, M. Šturlan: Nove mogućnosti u vođenju elektroenergetskih sustava primjenom podataka o atmosferskim pražnjenjima, 11. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2013.
- [7] I. Ivanković, D. Peharda, D. Novosel, K. Žubrinić-Kostović, A. Kekelj: Smart grid substation equipment maintenance management functionality based on control center SCADA data, Journal of Energy, Vol.67, No.3, 2018, 30-35
- [8] I. Uglešić, V. Milardić, B. Franc, B. Filipović-Grčić, J. Horvat: Establishment of a new lightning location system in Croatia, Study Committee CIGRE C4 on System Technical Performance, A Colloquium on: Lightning and Power Systems -Technical Papers, Kuala Lumpur, CIGRE, 2010.
- [9] B. Franc, I. Uglešić, K. Mesić, M. Šturlan, S. Piliškić: Analiza isklopa prekidača uzrokovanih udarima munja u prijenosnoj mreži u 2014. godini, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2015.
- [10] B. Franc, B. Filipović-Grčić, N. Stipetić, P. Križić: Statistika udara munja u vodove prijenosne mreže RH za 2018. godinu, 2019.
- [11] B. Filipovic-Grcic, I. Uglešic, V. Milardic, A. Xemard, A. Guerrier: Energy Stress of Surge Arresters Due to Temporary Overvoltages, IPST, Delft, 2011.
- [12] I. Ivanković, G. Levačić, A. Župan: Monitoring of Lightning Strikes and Evaluation of Energy Inflow on Substation Equipment, IEEEIC, Genova, 2019.