

Matjaž Jarc, dipl. ing. el.
C&G d.o.o. Ljubljana, Slovenija
matjaz.jarc@c-g.si

Matej Dečman, dipl. ing. el.
C&G d.o.o. Ljubljana, Slovenija
matej.decman@c-g.si

mr. sc. Marjan Bezjak, dipl. ing. el.
E-SENZOR d.o.o., Slovenija
marjan@e-projekt.si

Gregor Bezjak, dipl. ing. el.
E-SENZOR d.o.o., Slovenija
gregor@e-projekt.si

mr. sc. Viktor Lovrenčič, dipl. ing. el.
C&G d.o.o. Ljubljana, Slovenija
viktor.lovrencic@c-g.si

Branko Uhlík, dipl. ing. el.
OTLM d.o.o., Slovenija
branko.uhlik@c-g.si

Goran Ambrožič, dipl. ing. el.
E-SENZOR d.o.o., Slovenija
goran.ambrozic@gmail.com

ADVANCED LiSa® - SENZOR ZA OTKRIVANJE PREKINUTIH VODIČA

SAŽETAK

U tkz. pametnim elektroenergetskim mrežama potrebno je na određena mjesta postaviti mjernu opremu koja u kontrolni centar šalje informacije o mrežnim parametrima. U ovom referatu posebnu smo pozornost posvetili otkrivanju lokacija prekida vodiča, što je u nekim slučajevima vrlo teško otkriti. Problem prekinutih vodova i posljedično kvarova zbog visokog otpora (engl. High Impedance Fault - HIF) prisutan je od samih početaka elektroenergetike. U referatu smo osim kratkog prikaza dosadašnjih načina otkrivanja HIF-a i s time povezanih metoda detekcije prekida vodiča prezentirali i razvoj sustava Advanced LiSa® sa senzorom koji mjeri parametre električnog polja oko srednjenaponskih (SN) vodiča u radialnim mrežama. Na temelju promjene u parametrima ocjenjuje se jesu li vodiči prekinuti ili nisu.

Ključne riječi: LiSa, prekinuti vodiči, nadzemni vod, senzor električkog polja

ADVANCED LiSa® - SENSOR FOR THE DETECTION OF INTERRUPTED CONDUCTORS

SUMMARY

In smart grids, it is necessary to set up measuring equipment on certain sites which sends information about grid parameters to the dispatch centre. In this paper, we have focused special attention to discovering the location of the conductor interruption, which in some cases is very difficult to detect. The problem of broken lines and consequent failure due to High Impedance Fault - HIF has been present since the beginning of the electric power industry. In this paper, we have summarized the previous findings of detecting HIF and related methods of detection of the interrupted conductor. In the paper, we have presented the development of system Advanced LiSa® with sensor, which measures the parameters of the electric field around the conductors in the radial grids. Based on the change in the parameters, system evaluates whether the conductors are interrupted or not.

Keywords: LiSa, interrupted conductors, overhead line, electric field sensor

1. UVOD

1.1. Pametne mreže

U tkz. pametnim elektroenergetskim mrežama (engl. smart grids) potrebno je na određena mjesta postaviti mjernu opremu koja u kontrolni centar šalje informacije o mrežnim parametrima.

U izvanrednim situacijama kontrolni centar može djelovati automatski na temelju odgovarajućih algoritama ili je intervencija prepuštena dispečeru da više ili manje odgovarajuće djeluje na temelju podataka iz mreže.

Lokacije vodiča s pre niskim ili previsokim naponom, mjesta preopterećenih vodiča ili pak lokacije kvarova predstavljaju podatke potrebne za pravilno postupanje u slučaju redovitih i izvanrednih događaja.

Posebno su važne točne pozicije kvarova u mreži koji mogu biti točke kratkog spoja ili zemljospoja kao i točke gdje su prekinuti vodiči.

U ovom referatu poseban naglasak stavljen je na otkrivanje prekida vodiča koje je u nekim slučajevima vrlo teško otkriti, primjerice kada su vodiči izolirani ili su oštećeni u zraku ili se nalaze na nevodljivom kamenitom tlu.

1.2. Prekidi vodiča

Vodiči nadzemnih elektroenergetskih mreža mogu se prekidati, prelomiti ili pregorjeti iz raznih razloga. Uzroci mogu biti vanjski (mehanička preopterećenja poput leda, pada drveta, požara, atmosferskih pražnjenja ili intervencije treće osobe) ili unutarnji (neodgovarajući materijal, nezadovoljavajuća montaža, uporaba pogrešne tehnologije itd.). Prekidanje jednog ili više vodiča koji padaju na tlo najčešće otkriva električna zaštita. Ova zaštita bazira se na principu mjerenja električnih struja prema zemlji, koje nakon detekcije isključuje vodič u kvaru.

U nekim slučajevima struja između ležećeg prekinutog vodiča i zemlje nije dovoljno velika da se može prekid vodiča otkriti djelovanjem električne zaštite (npr. dugi vod, slab kontakt sa zemljom zbog izolacije na vodičima, stjenovito tlo, suhi pijesak, asfalt itd.). U svim tim slučajevima predstavlja visoki napon na tlu oko ležećeg vodiča ozbiljnu životnu opasnost sve dok se ne otkrije greška i dok se oštećeni vod ne isključi, što može potrajati nekoliko sati ili više.

Problem prekinutih vodova i posljedično kvarova zbog visokog otpora na mjestu kvara (engl. High Impedance Fault – HIF), odnosno visokoomski kvar prisutan je od samih početaka elektroenergetike, a prva objavljena i dostupna izvješća datiraju s početka 1960. U referatu ćemo ukratko prikazati dosadašnja saznanja i razne metode odnosno sredstva otkrivanja HIF-a i s time povezanih prekida vodiča kao i njihove prednosti odnosno slabosti.

Također smo opsežnije predstaviti istraživanja, razvoj i korištenje LiSa® sustava kao i istraživanja i razvoj Advanced LiSa® senzora odnosno uređaja, koji mjeri parametre električnog polja oko trofaznih vodiča i na temelju promjena parametara otkriva jesu li vodiči prekinuti ili ne.

Prikazat ćemo rezultate teorijske analize i rezultate simulacije trofaznog električnog polja ispod vodiča za referentno stanje te za stanja pod različitim kvarovima kao i model senzora.

Patentirana struktura i način rada senzora temelje se na mjerenju promjena različitih parametara električnog polja koji nastaju kada se vodiči prekidaju u vodu s različitim raspodjelama vodiča na stupu (horizontalna, delta itd.). Opisat ćemo prijedlog osnovne konstrukcije senzora i prijedlog zaštitnog sustava sa senzorima montiranim na stupove duž SN voda. Pri tome se za komunikaciju s centrom za daljinsko vođenje koristi GSM protokol.

1.3. HIF i stanje tehnike

HIF (High Impedance Fault) ili kvarovi zbog visokog otpora na mjestu kvara su opsežno istraženi od ranih 1960-ih s ciljem pronalaženja praktične, učinkovite i pouzdane metode detekcije. Razmotrene su različite tehnike detekcije HIF [1], [3] i [7-8]. Među različitim vrstama HIF kvarova je po život opasan pogotovo onaj na tlu ležeći vodič pod naponom.

Dok je neprekinute vodiče pod naponom na tlu ili u blizini tla vrlo teško, gotovo nemoguće otkriti, možemo prekinute vodiče koji uzrokuju HIF kvarove pod određenim uvjetima pouzdano detektirati i lokalizirati kvar.

Općenito su u komercijalnoj upotrebi uređaji, čiji rad se temelji na mjerenju parametara struje sa višim harmonijskim i neharmonijskim komponentama [4-8] kao i uređaji dizajnirani za mjerenje parametara sustava trofaznog napona duž i na kraju SN voda [2], [9-14], [17-18] i [21-26].

Uređaji za otkrivanje HIF kvarova koji se temelje na mjerenju strujnih parametara rade na sličan način i na istoj lokaciji kao i klasična zaštita, dakle na početku SN voda. Nedostatak ove zaštite je da s njom ne možemo utvrditi mjesto kvara, a i lažni alarmi nisu isključeni. Prednost ove zaštite je što može otkriti druge vrste HIF kvarova, uključujući i vodiče na tlu koji nisu prekinuti (ali ne uvijek).

Mjerenje parametara sustava trofaznog napona duž radijalnog voda s uređajem LISA® jednostavna je i pouzdana metoda za otkrivanje prekinutih vodiča pod naponom. Uređaje za otkrivanje prekinutih vodova možemo spojiti s visokonaponskim vodičima preko mjernih naponskih transformatora ili kapacitivnog djelatnika napona i možemo ih postaviti na stupove visokonaponskog voda [13] ili ih integriramo u daljinski sustav mjerenje kvalitete energije i daljinsku kontrolu TS SN/NN [21-22]. Suvremena bežična komunikacija omogućuje nam jednostavno i nezavisno prenošenje informacija o kvarovima i izravnu ili neizravnu integraciju u centar daljinskog vođenja.

Nedostatak tih uređaja je da je za mjerenje sustava napona potrebna izravna žičana veza između SN vodiča i uređaja za detekciju što tijekom montaže zahtjeva isključenje SN voda, a u pogonu su ti uređaji zbog izravne veze s vodičima izloženi atmosferskim i pogonskim prenaponima na SN vodičima.

Da bismo izbjegli ove neugodnosti i pojednostavili, odnosno pojeftinili uređaj za otkrivanje prekida vodiča razvijen je Advaced LiSa® senzor za bežičnu detekciju prekida vodiča. Senzor mjeri parametre električnog polja ispod trofaznih vodiča u radijalnom SN vodu i na temelju promjena parametara otkriva prekide vodiča.

2. DETEKCIJA PREKIDA VODIČA

2.1. LiSa® (LifeSAfer)

U Sloveniji postoji više od 700 km SN vodova izvedenih s poluizoliranim (PIV) vodičima [15] i [16]. Zbog mehaničkih oštećenja, loše montaže, neodgovarajućeg materijala, jakih atmosferskih pražnjenja i vibracija ili drugih uzroka, dolazi u takvom vodu do čestih prekida (pucanja) vodiča (u posljednjih nekoliko godina zabilježeno nešto više od 70 slučajeva). Zaštita u trafostanicama zbog izolacije između vodiča i zemlje često ne prepoznaje prekid PIV vodiča zbog čega ne isključuje vod koji je u kvaru.

U svim tim slučajevima prekinuti vodič pod naponom predstavlja životnu opasnost za ljude ili životinje sve dok se ne otkrije greška i električni vod se ne isključi. Vrijeme u kojem se to događa može potrajati nekoliko sati, u iznimnim slučajevima čak i nekoliko dana.

Problem neidentificiranih prekinutih vodiča pod naponom, a posebno problem prekinutih poluizoliranih vodiča u SN nadzemnim vodovima, izazvao je u stručnim krugovima u Sloveniji mnogo uzbuđenja. Bio je povod pronalasku zaštitnog uređaja koji bi detektirao prekid vodiča, a zatim bi isključio vod u kvaru.

Zato je udruženje elektrodistribucija Slovenije 2004. godine uvelo moratorij na daljnju izgradnju električne mreže sa PIV vodičima dok se ne izradi studija koja će istražiti uzroke čestih prekida PIV vodiča te dati usmjerenja za buduću izgradnju mreže. Tome usmjerenju nedvojbeno pripada zaštitni uređaj za otkrivanje prekinutog vodiča, jer će u pouzdanim i brižljivo građenim vodovima i dalje dolaziti do prekida vodiča zbog različitih uzroka.

Prepoznavanje prekinutih PIV vodiča nije moguće niti sa osjetljivom zemljospojnom zaštitom, zato je razvijen i izrađen novi električni zaštitni uređaj za otkrivanje prekinutog vodiča. Ovaj uređaj nazvan je LiSa® (LifeSafer).

U distribucijskom poduzeću Elektro Primorska ustanovljeno je da kod višestrukih prekida PIV vodiča električna zemljospojna zaštita u TS Ilirska Bistrica, izvod Matulji, nije prepoznala zemljospoj pa zato i nije isključila vod u kvaru. Slični problemi su se pojavili i na DV Cerkljanski vrh, koji se napaja iz TS Cerkno. Stoga su već 2006. godine odlučili opremiti dva dalekovoda s uređajima LiSa®, što je realizirano u 2007. godini.

Uređaj LiSa® mjeri sustav SN trofaznih napona, odnosno fazne i međufazne napone pomoću tri kapacitivna djelitelja napona. Na temelju tih vrijednosti i posebnog algoritma detektira jedan, dva ili tri prekinuta vodiča.

U slučaju prekida vodiča uređaj LiSa® alarmira sustav za nadzor mreže. Na temelju te informacije, dežurna služba poduzme sve potrebne mjere kako bi osigurala siguran rad. Odluka o neposrednom isključivanju voda u kvaru i načinu uklanjanja nenormalnog radnog stanja uglavnom je prepuštena odgovornim osobama distributera (dispečerima).

Iskustvo testiranja sustava za zaštitu uglavnom su bila dobra, iako su se tijekom godina pojavljivali lažni alarmi uslijed različitih problema u kapacitivnim razdjelnicima napona.

Elektro Primorska je 2011. godine odlučila nadograditi sustav LiSa® sa zahtjevom za neposrednim automatskim isključivanjem voda s prekinutim vodičima čak i u slučaju prenapajanja SN voda.

2.2. Nadgradnja sustava LiSa®

Nadgradnja sustava LiSa® je pred izvođače postavila sljedeće zahtjeve:

- zbog potrebe za neposrednim isključenjem voda potrebno je pomoću metode dvostrukog mjerenja na SN vodu i na NN transformatorske stanice odnosno na SN vodu i NN daljinsko upravljivog učinskog rastavljača u točki mjerenja spriječiti lažne alarme, što se pokazalo kao vrlo uspješno,
- izrada sveobuhvatne programske opreme za konzentator sustava, koji će omogućiti neposredno isključenje najbližeg prekidača ispred mjesta kvara čak i kada se SN vod napaja iz drugog, nestandardnog, smjera napajanja,
- integracija sustava LiSa®, sustava daljinske kontrole i upravljanja transformatorskih stanica i SN vodova, sustava za kontrolu kvalitete energije i sustava za daljinsko mjerenje energije,
- da je sustav LiSa® i dalje sastavni dio električne zaštite SN distribucijske mreže.

Koncept rada sustava:

- dvostruko mjerenje naponskog sustava u točkama distribucijske mreže,
- agregacija podataka na razini RTU jedinice,
- prijenos podataka preko telekomunikacijskih kanala u konzentator,
- obrada prenesenih podataka iz mjernih točaka u mreži i usporedba vrijednosti u modelu algoritma,
- algoritam prepoznaje stanje mreže,
- prijenos alarma u centar vođenja (DC), SMS poruka odgovornom osoblju,
- daljinsko isključenje voda u kvaru.

Kontrolni sustav čine:

- računalni konzentator na središnjoj lokaciji koji vodi računa o aplikaciji i pohranjivanju podataka te za prijenos podataka za druge aplikacije upravljačkog sustava,
- RTU jedinice u određenim točkama u mreži osim daljinskog isključivanja pokvarenog voda omogućavaju sljedeće: prikupljanje podataka, vođenje mjernih centara i mogućih drugih inteligentnih uređaja na objektu preko komunikacijskih veza s uređajima (RS232, RS485, Ethernet), signalno prikupljanje podataka i upravljanje uređaja putem pomoćnih/signalnih kontakta ili sučelja uređaja (stanje prekidačkih i zaštitnih uređaja, prikupljanje analognih mjerenja, uključanje/isključanje uređaja itd.), jedinstvena kontrola svih uključenih podsklopova za različite funkcionalnosti, kao što su praćenje pouzdanosti opskrbe, mjerenje kvalitete električnog napona, praćenje radnih parametara, lokalno zapisivanje svih mjerenja i događaja, opremljenih vremenskim oznakama za prijenos u kontrolni centar.

2.3. Advanced LiSa® sa senzorom za otkrivanje prekida vodiča

Svi poznati uređaji i metode temelje se na mjerenju napona na vodičima trofaznog elektroenergetskog voda, tako da su vodiči i mjerni uređaj povezani žicama. Zbog toka je tijekom montaže mjernih uređaja potrebno isključiti vodiče, a za vrijeme rada postoji mogućnost kvarova mjernog uređaja zbog atmosferskih i drugih prenapona na vodičima.

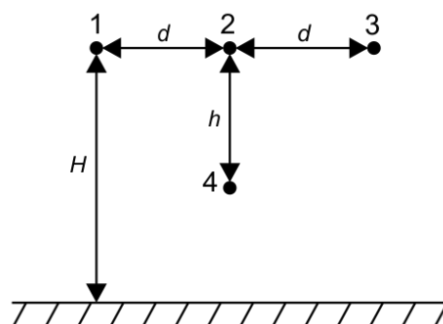
Stoga je 2012. godine započelo istraživanje razvojne mogućnosti uređaja za otkrivanje prekida vodiča bez povezivanja s vodičima SN mreže. Razvijena je teorijska analiza i simulacija električnog polja oko trofaznih vodiča nadzemnog voda, uzimajući u obzir geometriju vodiča u dvodimenzionalnom prostoru i sinusoidne vremensko promjenjive trofazne napone na vodičima.

Mjerenje je obavljeno u visokonaponskom laboratoriju i na testnom poligonu gdje su pomoću natisnutih napona simulirani naponski uvjeti tipični za različite raspodjele vodiča i razne vrste prekinutih vodiča (prekinut je jedan vodič na lijevoj strani, zatim na desnoj, pa gore kao i prekidanje dva vodiča također u raznim kombinacijama). Ispitivanja su provedena i na stvarnim SN vodovima s isklapanjem vodiča.

Model i način rada senzora temelji se na mjerenju promjena različitih parametara električnog polja do kojih dolazi tijekom prekida vodiča u vodu pri različitim raspodjelama vodiča na stupu, primjerice horizontalna, delta, itd. Razvijen je konstrukcijski model senzora i način detekcije s jednom elektrodom kao i model i metodu otkrivanju pomoću dvije elektrode. Senzori su montirani na stupove duž SN voda. Pri tome se za komunikaciju s centrom za daljinsko vođenje koristi GSM protokol.

2.3.1. Teorija električnog polja

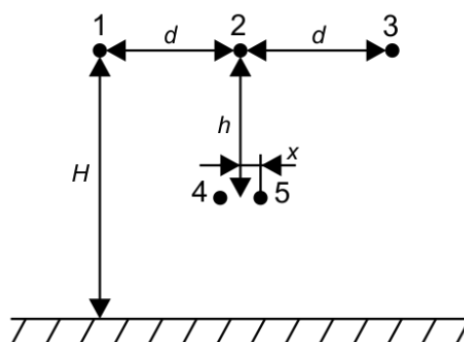
Analiziran je sustav s jednom elektrodom kako je prikazano na slici 1. Tri vodiča 1, 2 i 3 na udaljenosti d i visini H s istim svojstvima i geometrijom, postavljeni su iznad uzemljene podloge. Mala valjiva elektroda 4 nalazi se ispod srednjeg vodiča 2, na udaljenosti h .



Slika 1. Sustav s jednom elektrodom 4

U trenutku prekida vodiča teoretska analiza pokazala je značajan porast električnog potencijala na elektrodi i fazni pomak u odnosu na sinusoidu električnog potencijala prije prekida.

Slika 2 prikazuje sustav s dvije elektrode 4 i 5:



Slika 2. Sustav s dvije elektrode 4 i 5

Elektrode 4 i 5 su na udaljenosti x u odnosu na simetralu. U takvom jednostavnom modelu, analiziran je fazni kut između sinusoida električnog potencijala na obje elektrode i otkriveno je da se u trenutku prekida vodiča, fazni kut između sinusoida električnog potencijala na elektrodama značajno smanji, a nakon prekida dva vodiča jednak je nuli.

Zaključak je bio da u algoritmu za otkrivanje prekida vodiča osim promjene potencijala treba uzeti u obzir i promjenu kuta između dvije elektrode. To je važno, jer vremenski uvjeti znatno utječu na mjerenje električnog potencijala, a manje na promjenu kutova između sinusnih funkcija električnog potencijala na jednoj i drugoj elektrodi.

2.3.2. Simulacija referentnog stanja i stanja kada je vodič prekinut

Simulacija je provedena na računalu s programima za računanje Maxwellovih jednadžbi metodom konačnih elemenata za određeni fizikalni model. Potvrdila je teoretske izračune i pokazala da diferencijacija jednog ili dva prekinuta vodiča nije moguća samo na osnovi povećanja električnog potencijala, nego na temelju kuta između sinusoida potencijala na obje elektrode, kako je prikazano u tablici I.

Tablica I. Sažetak simulacije pod različitim uvjetima

Uvjet	$ V_4 $ i $ V_5 $	$ \Delta\phi $
$U_1 = U_2 = U_3 = 11,56 \text{ kV}$	1	92°
$U_1 = 0 \text{ V}, U_2 = U_3 = 11,56 \text{ kV}$	4.5	8°
$U_2 = 0 \text{ V}, U_1 = U_3 = 11,56 \text{ kV}$	5.1	18°
$U_1 = U_2 = 0 \text{ V}, U_3 = 11,56 \text{ kV}$	4.4	0°

U tablici I U_1, U_2, U_3 predstavljaju fazne napone, V_4 i V_5 električni potencijal na elektrodama 4 i 5, a $|\Delta\phi|$ apsolutnu vrijednost faznog kuta između sinusoida električnog potencijala na elektrodama.

2.3.3. Rezultati mjerenja na testnom poligonu

Mjerenja su provedena s međufaznim naponima od 10, 20 i 35 kV, na modelu koji je bio replika nadzemnog trofaznog elektroenergetskog voda, s visinom najnižeg vodiča 5,8 m iznad zemlje i s različitim položajima vodiča (horizontalni, delta i trokutasti). Mjerenja su izvedena sa senzorom s dvostrukim elektrodama 4 i 5, pri različitim naponskim razinama, i za različite položaje vodiča.

Tablica II. Primjer rezultata, dvostruke elektrode 4 i 5, fazni napon 11,56 kV

Položaj	Parametar	Naponski uvjeti (prisutnost pojedinačnih faza)			
		$U_1 U_2 U_3$	$U_1 U_2$	$U_1 U_3$	$U_2 U_3$
Horizontalni	$ \Delta\phi $	169°	12°	49°	15°
	V_4	34	60	84	81
	V_5	17	59	56	49
Delta	$ \Delta\phi $	83°	27°	55°	2°
	V_4	68	133	185	175
	V_5	39	72	75	61
Trokutasti	$ \Delta\phi $	112°	13°	60°	17°
	V_4	70	89	146	136
	V_5	36	76	75	52

Rezultati kod faznog napona voda 11,56 kV u tablici II pokazuju da, unatoč činjenici da se zbog prisutnosti kvara električni potencijal V_4 odnosno V_5 na elektrodama 4 i 5 povećava, njegova je vrijednost amplitude vrlo osjetljiva na lokaciju i uvjete okoline, primjerice na konfiguraciju terena, na razmak elektroda 4 i 5, na prisutnost drugih objekata u neposrednoj blizini i slično. Također, amplituda potencijala na elektrodama 4 i 5 jako varira ovisno o položaju vodiča. Kao rezultat toga, mjerenja potencijala su izrazito valovita, a granice između referentnih uvjeta i kvara su manje izražene.

Otkrivanje kvara koje se temelji samo na mjerenju amplituda potencijala na elektrodama 4 i 5 je moguće, ali zahtijeva puno prilagodbi i kalibraciju senzora prema konfiguraciji položaja vodiča, obliku terena i slično. S druge strane, mjerenjem apsolutne vrijednosti faznog kuta $|\Delta\phi|$ između potencijala elektroda 4 i 5 dobivamo stabilne i pouzdane rezultate, bez obzira na položaj vodiča, a manji je i utjecaj konfiguracije terena odnosno drugih okolišnih čimbenika (magla, kiša, snijeg ...).

2.3.4. Testiranje na 20 kV dalekovodu

Testiranje prekida vodiča u stvarnom okolišu provedena su na 20 kV dalekovodu. Tijekom ispitivanja testirane su različite verzije senzora s jednom i dvije elektrode na različitim visinama. Prekidi su izvedeni u intervalima od 5 minuta kako bi se izbjegle eventualne prijelazne pojave u mreži i da je u mreži uspostavljeno stabilno stanje.

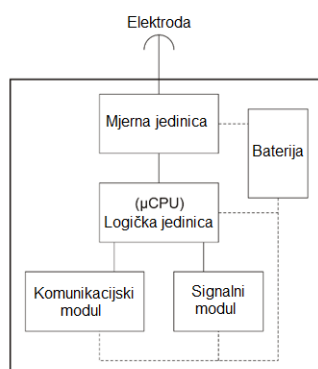
U tablici III prikazani su rezultati mjerenja potencijala V_4 i V_5 odabranog senzora s dvije elektrode kod pokusa s otvorenim (neopterećenim) vodom i vodom pod opterećenjem.

Tablica III. Rezultati testa stvarnom okruženju					
Naponski uvjeti (prisutnost pojedinačnih faza)					
	Otvoreni (neopterećeni) vod			Opterećeni vod	
	U_1 U_2 U_3	U_2 U_3	U_3	U_1 U_2 U_3	U_2 U_3
$ \Delta\phi $	90°	10°	0,2°	90°	12°
V_4 (V)	320	900	970	320	900
V_5 (V)	330	900	970	320	900

Rezultati ispitivanja u stvarnom okruženju potvrđuju teoriju i rezultate dobivene na testnom poligonu. Na temelju toga su izvedeni različiti algoritmi za otkrivanje prekinutih vodiča u nadzemnom SN vodu.

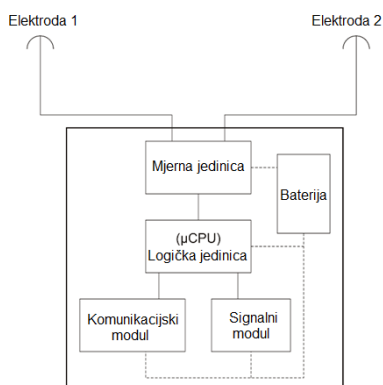
2.3.5. Model senzora

Slika 3 shematski prikazuje strukturu senzora s jednom elektrodom: mjerna jedinica koja s elektrodom povezuje vodič, logična jedinica za obradu podataka s ugrađenim algoritmima za otkrivanje prekinutih vodiča na temelju mjerenja promjena parametara električnog polja ispod elektroenergetskih vodova; komunikacijski modul, signalni modul za lokalnu signalizaciju odnosno daljinsko obavješćavanje i baterija za napajanje.



Slika 3. Primjer senzora s jednom elektrodom

Slika 4 shematski prikazuje sastav Advanced LiSa® senzora s dvije elektrode sličnog sastava.



Slika 4. Primjer Advanced LiSa® senzora s dvije elektrode

2.3.6. Metoda za otkrivanje prekinutih vodiča

Metoda za otkrivanja prekinutih vodiča pomoću senzora s jednom elektrodom ima dizajniran algoritam koji se temelji na mjerenju sinusoide potencijala električnog polja na elektrodama prije kvara i u trenutku kvara kada se električno polje promijeni tako da električni potencijal na elektrodi očuva frekvenciju. Ujedno dolazi do trenutnog vremenskog pomaka sinusoide električnog potencijala u odnosu na sinusoidu električnog potencijala prije kvara. Istodobno, povećava se i amplituda potencijala sinusoide na elektrodi.

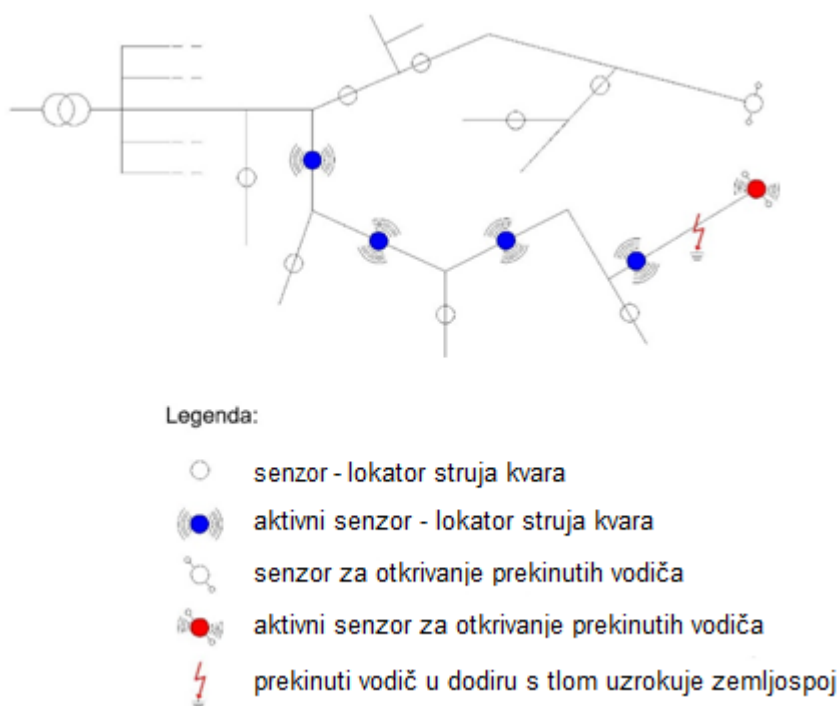
Metoda za otkrivanje prekinutih vodiča s Advanced LiSa® senzorom s dvije elektrode pouzdanija je od metode s jednom elektrodom. Algoritam koristi mjerenja parametara potencijala električnog polja na elektrodama 4 i 5, dakle u dvije točke u blizini kontroliranog voda. Fazna razlika (fazni kut $\Delta\phi$) između sinusoide potencijala na elektrodi 4 i elektrodi 5 te amplitude V_4 i V_5 dvaju električnih potencijala u promatranim točkama predstavljaju parametre na temelju kojih se pouzdano određuje prekid i tip istog. U simetriji imaju fazni kut $\Delta\phi$ i amplitude V_4 i V_5 određenu referentnu vrijednosti i $\Delta\phi_{REF}$ odnosno V_{REF} . U slučaju prekida jednog vodiča, fazni kut $\Delta\phi$ se smanji, a amplituda V_4 i V_5 povećaju. U slučaju prekida dva vodiča je fazni kut $\Delta\phi$ između amplituda V_4 i V_5 na dvije elektrode približno nula, a amplitude V_4 i V_5 dodatno se povećaju ako je iza senzora na vodu priključen trofazni transformator ili se čak i ne mijenjaju kada je senzor na kraju otvorenog voda.

2.3.7. Kombinacija senzora i lokatora struja kvara

Senzor električnog polja, kojeg smo razvili, po svojoj strukturi, načinu montaže i korištenju sličan je indikatoru odnosno lokatoru struja kvara, koji mjeri magnetsko polje ispod vodiča trofaznog elektroenergetskog voda te na temelju izmjerenih promjena parametara magnetskog polja otkriva i javlja zemljospojeve i kratke spojeve u vodičima.

Indikatori, kao i predstavljeni senzori, postavljeni su na određenim lokacijama na stupovima duž elektroenergetskog SN voda.

Indikatori su također opremljeni lokalnom signalizacijom i komunikacijskim modulom za bežično slanje poruka o kvaru i o lokaciji istog u kontrolni centar. Zato je izvedena integracija poznatog rješenja indikatora struje kvara i senzora za otkrivanje prekinutih vodiča u jedan uređaj sa zajedničkom baterijom, zajedničkom komunikacijskom jedinicom, zajedničkom signalnom jedinicom, sa dvije odvojene mjerne jedinice i dvije odvojene logičke jedinice sa elektrodama za mjerenje električnog polja i zavojnicom za mjerenje magnetskog polja.



Slika 5. Primjer raspodjele senzora lokatora unutar mreže i senzora na kraju odcjepa DV-a

Svi lokatori struje kvara unutar trofaznog voda će biti opremljeni s mogućnošću mjerenja električnog polja za otkrivanja prekinutih vodiča. Tako bi lokator senzori ispred lokacije kvara vodiča s prekinutim vodičem u dodiru s tlom upozoravali na struju kvara ili struju zemljospoja, a lokator senzori iza lokacije kvarova sa prekinutim vodičem bi javili prekinut vodič.

Na krajevima većine dalekovodnih odcjepa moglo bi se zbog sigurnosti i niske cijene ugraditi veći broj senzora električnog polja s dvije elektrode za otkrivanje prekinutih vodiča u SN vodovima.

3. ZAKLJUČAK

Teoretska istraživanja, mjerenja u VN laboratoriju i na testnom poligonu te testovi na stvarnom SN dalekovodu pokazali su da je sa senzorom koji mjeri električno polje ispod vodiča moguće pouzdano otkriti prekide vodiča. Pouzdaniji su rezultati dobiveni s Advaced LiSa® senzorom s dvije elektrode, zato je odlučeno posvetiti mu više pozornosti pri planiranju konstrukcije elektroda.

Razvoj Advaced LiSa® senzora za otkrivanje prekinutih vodiča u SN vodovima dovršen je do te mjere da se veća količina prototipa može proizvesti i testirati na stvarnom demonstracijskom poligonu. U budućnosti puno pozornosti treba posvetiti dizajniranju konstrukcije kućišta (vodonepropusnost tijekom više od deset godina, vandalizam, minimiziranje), baterijskom napajanju, potrošnji energije (zamjena baterije svakih deset godina, povezivanje sa solarnim panelima), integraciji u aplikativni okoliš korisnika i povezivanju raznih tehnologija (prijenos podataka putem nekoliko komunikacijskih kanala u svrhu povezivanja tehnologija korištenjem standardnih komunikacijskih protokola).

S razvojnim projektom Advaced LiSa® želimo u budućnosti razvijati i implementirati globalno rješenje za operatore distribucijskih i prijenosnih mreža.

Razvojni projekt Advaced LiSa® je dio EU sufinanciranog projekta (rezultat projekta bit će tehnologija Advaced LiSa® s dostignutom tehnološkom razinom 9).

U konačnici bi projekt operaterima distribucijskih i prijenosnih mreža u svijetu omogućio trenutno nepostojeća dodatna mjerenja i značajno povećao prikupljanje ključnih podataka za donošenje odluka.

U slučaju upozorenja o opasnosti, preopterećenju ili grešci na infrastrukturi, tvrtke poput Elektro Primorske, Elektro Ljubljana, Elektro Celje, Elektro Maribor i Elektro Gorenjska te ELES moći će reagirati brže i tako utjecati na povećanu konkurentnost energetske mreže.

4. LITERATURA

- [1] High Impedance Fault Detection Technology, Report of PSRC Working Group D15, March 1996.
- [2] L. Li, M. A. Redfern, "A review of techniques to detect downed conductors in overhead distribution system", IEEE Proceedings and Developments in Power System Protection, vol. 479, pp. 169-172, 2001.
- [3] M. Sedighizadeh, A. Rezazadeh, N. I. Elkalashy, "Approaches in High Impedance Fault Detection - A Chronological Review", Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 114-128, 2010.
- [4] J. Stoupis, M. Maharsi, R. Nuqui, S. A. Kunsman, R. Das, "Reliable Detection of high-impedance faults caused by downed conductors", ABB Review 1/2004.
- [5] A. C. Depew, J. M. Parsick, R. W. Dempsey, C. L. Benner, B. Don Russell, M. G. Adamiak, "Field Experience with High-Impedance Fault Detection Relays", IEEE Proceedings of the 2006 Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2006.
- [6] D. Hou, "Detection of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2006.
- [7] V. T. Garcia, H. R. Paredes, "High impedance fault detection in Distribution System using Wavelet Transform". Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2011 8th International Conference, Merida City, 10.1109/ICEEE, 2011.
- [8] M. bin Sulaiman, A. H. Tawafanm, Z. bin Ibrahim, "Detection of High Impedance Fault using Probabilistic Neutral-Network Classifier", Journal of Theoretical and Applied Information Technology 20th July 2013, Vol. 53, No.2 © 2005 - 2013 JATIT & LLS, 2013.

- [9] C. Westrom, A. P. Sakis, G. J. Cokkinides, A. H. Ayoub, "Open Conductor Detector System", IEEE Transactions on Power Delivery 7, No. 3, New York, July 1992.
- [10] E. C. Senger, W. Kaiser, J. C. Santos, P. M. S. Burt, C. V. S. Malagodi, "Broken Conductors Protection System Using Carrier Communication", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, New York, April 2000.
- [11] L. Garcia-Santander, P. Bastard, M. Petit, I. Gal, "Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks", Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings Vol.152, Issue 2, March 2005.
- [12] E. Bjerkan, H. K. Hoidalen, J. G. Hernes, "Reliable Detection of Downed and Broken Conductors", CIGRE, 19th International Conference on Electricity Distribution Vienna, May 2007.
- [13] M. Bezjak, Z. Toroš, "Device and method for indicating and signaling changes in three-phase voltage system of power line, with purpose to detect interrupted conductor", EP 2 019 323 A1, Priority 27-07-2007, Bulletin 2009/05, Munich, 28.01.2009.
- [14] M. Bezjak, Z. Toroš, "Remote operation control of a MV/LV transformer station and remote signaling of faults", EP 2 109 205 A1, 09-04-2008, European Patent No. 2109206, Munich, 13. March 2013.
- [15] V. Lovrenčič, "Slovene experience on using covered conductors (PAS system) in medium voltage network", Processings China International Conference on Electricity Distribution (CIGRE 2000), Shanghai, 17.-20.10.2000.
- [16] T. Leskinen, V. Lovrenčič, "Finnish and Slovene experience on covered conductor overhead lines", Processings CIGRE Session 30, Group B2, Paper B2-207, Paris, 23. – 27.8.2004.
- [17] V. Lovrenčič, S. Peulič, Z. Dimović, "Naprava za odkrivanje in izklop voda s prekinjenimi vodniki – primer pilotske instalacije na Elektro Primorska", CIGRE-CIGRE, Čatež, 2007.
- [18] M. Dečman, V. Lovrenčič, Z. Toroš, S. Ceferin, M. Bezjak, B. Turnšek, B. Likar, "Napredna zaščita nadzemnih vodov v primeru pretrganega vodnika", CIGRE-CIGRE, Laško, 2013.
- [19] P. Ceferin, B. Likar, S. Ceferin, Z. Toroš, "Koncept in rešitve nadzora v distribucijskem omrežju na ravni TP", CIGRE-CIGRE, Ljubljana, 2011.
- [20] Z. Toroš, P. Ceferin, B. Likar, "Integration of MV/LV substation and functionalities using unified telecommunication concept", CIGRE, Frankfurt, 2011.
- [21] V. Lovrenčič, Z. Toroš, S. Ceferin, M. Bezjak, B. Turnšek, B. Likar, M. Dečman, "Advanced protection of overhead lines in event of interrupted conductor", CIGRE, Stockholm, 2013.
- [22] Z. Toroš, B. Turnšek, "Advanced protection of Overhead Lines in Elektro Primorska Slovenia", T&D WORLD MAGAZINE, 26.3.2015.
- [23] M. Bezjak, G. Ambrožič, M. Finc, F. Bertonecelj, G. Bezjak, „Senzor za brezžično detekcijo prekinitve vodnikov v trifaznem nadzemnem elektroenergetskem vodu ter metoda v zvezi s tem“, Patentna prijava št. 201400330.
- [24] M. Bezjak, G. Ambrožič, M. Finc, F. Bertonecelj, G. Bezjak, „A new look at the detection of interrupted and downed conductors in the MV overhead lines“, CIDEL, Buenos Aires, 2014.
- [25] M. Bezjak, G. Ambrožič, M. Finc, F. Bertonecelj, G. Bezjak, „Nov pogled na odkrivanje pretrganih vodnikov v SN nadzemnih vodih“, 2. Konferenca o vzdrževanju elektroenergetskih objektov, CIGRE-CIGRE, Nova Gorica, 2014.
- [26] M. Bezjak, G. Ambrožič, M. Finc, R. Bertonecelj, G. Bezjak, „Senzor za detekcijo pretrganih vodnikov in za detekcijo kratkostičnih in zemljostičnih tokov“, CIGRE-CIGRE, Portorož, 2014.