

DIAGNOSTIKA ENERGETSKIH KABLOV

Luka Paulini
tel: 041 806 615

Povzetek – Diagnosticiranje energetskih kablov je smiselno tako s tehničnega kot tudi z ekonomskega vidika. Tehnično nas zanimajo različne merilne metode in njihova učinkovitost, vrste napak ter vzroki zanje. Ekonomsko gledano pa primerjamo stroške diagnostike in stroške popravil nepričakovanih napak ter stroške preventivnega vzdrževanja na podlagi stanja s stroški korektivnega vzdrževanja.

DIAGNOSTICS OF POWER CABLES

Luka Paulini
tel: 041 806 615

Abstract – Diagnostics of power cables is interesting from technical and economic point of view. Technically we are interested in different measuring methods and their effectiveness, types of errors and the reasons for them. Economically we weigh costs of diagnostics against the repair costs of unexpected errors and the costs of prevention maintenance on the condition basis against the costs of corrective maintenance.

I. UVOD

Podzemni kabli, ki prenašajo vse več moči se praviloma nahajajo na območjih z gosto infrastrukturo. V večjem delu je distribucijsko kabelsko omrežje zgrajeno iz kabla s papirno izolacijo, vendar se v zadnjem desetletju vse pogostejše uporabljajo XLPE izolirani kabli.

Poznamo tri vrste vzdrževanj kabelskih omrežij :

- korektivno vzdrževanje,
- preventivno vzdrževanje po časovnih presledkih,
- preventivno vzdrževanje glede na stanje.

Korektivno vzdrževanje se izvaja ob izpadu ali odpovedi opreme. Tako vzdrževanje lahko privede do velikih stroškov popravila in v nekaterih primerih tudi do odškodnin.

Preventivno vzdrževanje se izvaja v rednih časovnih presledkih, ki so določeni na podlagi izkušenj, priporočil ali dejanskega stanja.

Na podlagi dejanskega stanja ugotovljenega z diagnostiko se lahko vzdrževanje, širjenje, posodobitev načrtuje in izvaja, kadar je to potrebno. Lastniki oziroma upravljalci kabelskih omrežij želijo zmanjšati stroške vzdrževanja, podaljšati življenjsko dobo in s tem zagotoviti višjo stopnjo učinkovitosti dobave električne energije.

Z diagnosticiranjem je mogoče doseči oceno stanja izolacije kabla. Na podlagi pridobljene ocene se lahko določi popravilo ali zamenjava, kar omogoča planiranje stroškov investicij. Diagnosticiranje ima pozitiven vpliv na denarni tok, saj znižuje tveganje. Izloči možnost nepričakovanih (izrednih) stroškov (izpada) in s tem nenačrtovanih premikov v denarnem toku. Omogoča možnost rednega planiranja stroškov investicij in s tem boljšo finančno likvidnost podjetja.

II. PREIZKUŠANJE KABLOV PO POLAGANJU

Kable po polaganju preizkušamo zaradi možnih poškodb na izolaciji. Kabel se lahko poškoduje med transportom, polaganjem, zasipavanjem ali med montažo kabelskega pribora.

Plašč kabla preizkušamo z enosmerno napetostjo, izolacijo pa z različnimi metodami. Najprimernejša je metoda z izmenično napetostjo, frekvence 50Hz, ker je ta oblika enaka obratovalnim vrednostim. Vendar če želimo kabel, ki ima veliko kapacitivnost preizkušati z omrežno napetostjo potrebujemo veliko jalove moči. To je v praksi težko izvedljivo zaradi velikosti merilne opreme in težko dostopnega terena. Namesto te so razvili alternativne metode kot so: VLF, impulzna napetost in DAC, ki zmanjša kapacitivni pomnilni tok. Z zmanjšanjem

frekvence - VLF metodo zmanjšamo potrebe po jalovi moči s faktorjem 500. Merilna oprema za preizkušanje z VLF je manjša, lažja in primernejša na pogosto težko dostopnih krajih.

Primerja med metodama:

$$I = U \times \omega \times C$$

$$I = 48\text{kV} \times 2\pi \times 50\text{ Hz} \times 10^{-6}$$

$$I = 15\text{A}$$

$$I = U \times \omega \times C$$

$$I = 48\text{kV} \times 2\pi \times 0.1\text{ Hz} \times 10^{-6}$$

$$I = 30\text{mA}$$

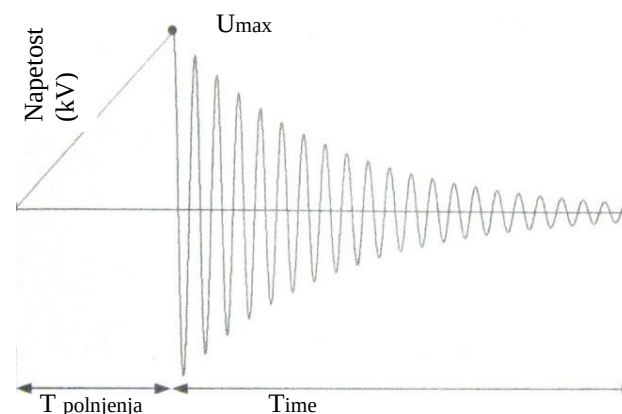
III. MERILNE METODE ZA MERJENJE DELNIH PRAZNITEV

Večina kablov je zakopanih v zemljo, zato je možno dostopati samo do kabelskih končnikov, ki jih uporabimo za električno detekcijo napak.

Z on-line metodo odkrivanja delnih praznitev se test opravi pod realnimi pogoji delovanja in sicer v delovni napetosti. Slaba stran te metode je velik vpliv hrupa na meritve, ki izvira iz ozemljitev in težav pri iskanju signalov refleksije iz transformatorja in stikališča. Zaradi teh napak oziroma pomanjkljivosti se priporoča izvajanje off-line.

Pri off-line meritvah poznamo več vrst merilnih metod za odkrivanje delnih razelektritev. Metoda z neprekinjenim električnem napajanjem z znižano frekvenco VLF, metodo z predhodnim preklapljanjem z impulzno napetostjo in metodo z dušeno AC (DAC) napetost.

DAC merilna metoda se vse bolj uporablja za diagnozo delnih praznitev in zmanjšuje potrebe po električni energiji. Merilna naprava kabel napolni z enosmerno napetostjo in ko doseže nastavljeno vrednost, preklopi v serijo zunanji »induktor«. Rezultat je nihalni val napetosti za vzbujanje delne praznitve.



Slika 1: merilna metoda DAC

Vrednost frekvence je odvisna od kapacitivnosti kabla, ki jo lahko izračunamo po enačbi:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Za uspešno preverjanje kablovoda mora biti frekvenca manjša od 500Hz. Če v praksi to ni izvedljivo, se paralelno doda ustrezni kondenzator.

IV. STANDARDI ZA PREIZKUŠANJE IN DIAGNOSTICIRANJE KABLOV

Za izvajanje tovrstnih meritev se najpogosteje srečamo z IEC ali CENELEC standardi. V Sloveniji imamo privzete standarde z oznako SIST, v nekaterih primerih so lahko tudi harmonizirani HD standardi. Harmonizirani dokumenti HD nastanejo v primeru, ko pri nekaterih zahtevah standarda pride do razlik med posameznimi državami članice evropske standardizacije.

Tip 12/20kV XLPE	Standard	Upre	Čas
Plašč	IEC 60229	4-10 kV	1 min
Izolacija	IEC 60502-2	48 kV	15 min
Tan δ	SIST HD 620	36 kV	60 min
PD (50hz, DAC, VLF)	IEC 60270	24 kV	60 min

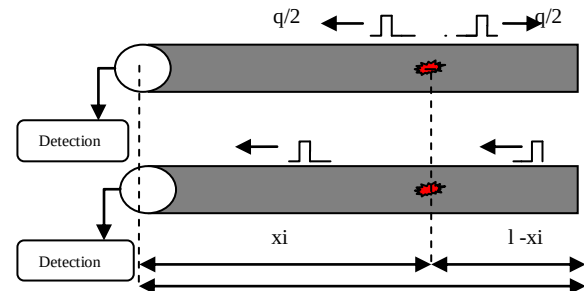
Tabela 1: seznam standardov glede na tip meritev in napetostni nivo kabla.

V. MERILNE METODE ZAZNAVANJA DELNIH PRAZNITEV

Poškodbe napajalnih kablov se kažejo v različnih vrstah parcialnih praznjenj (PD). Za odkrivanje in lociranje parcialnih praznjenj znotraj kabskega sistema je več tehnik. Najpogosteje uporabljena je tehnika z električnim odkrivanjem. Kot manj uporabna se je izkazal metoda optično prepoznavanje. V določenih primerih se PD lahko odkriva z zvočno detekcijo.

Pri električnem odkrivanju napak refleksije lokacijo parcialnih praznjenj določimo z visokofrekvenčnimi impulzi, ki so na mestu reflektografa. Pulz, ki ga sprosti parcialno praznjenje potuje v obe smeri kabla. Ehometer (radar, reflektometer) prvi zabeleži impulz, ki je potoval od mesta parcialnih praznjenj proti začetku kabla. Drugi pulz ima zakasnitev, saj potuje od mesta nastanka, proti

oddaljenem koncu kabla, kjer se odbije ter nato prepotuje celotno dolžino kabla nazaj do ehometra. Če poznamo hitrost lahko izračunamo oddaljenost od mesta izvora. Hitrost se definira z vrsto izolacije, natančneje s specifično dielektrično konstanto. Za kabel s papirno izolacijo tako velja hitrost okoli 80m/us.



Slika 2: shematski prikaz detekcije delnih praznitev

$$\begin{cases} t_1 = \frac{x_i}{v} \\ t_2 = \frac{(l-x_i)}{v} \end{cases} \quad \Delta t = t_2 - t_1 \rightarrow$$

$$x_i = \frac{l - v \cdot \Delta t}{2}$$

Hitrost širjenja impulza se določi s pošiljanjem standardnega impulza kalibracije. Vzorec impulza potuje po dolžini kabla v določenem časovnem intervalu. Hitrost se izračuna s formulo:

$$v = \frac{2 \cdot l}{\Delta t_{cal}}$$

Zvočno odkrivanje napak se v praksi redko uporablja zaradi motenj iz okolice, zaradi katerih prihaja do netočnih rezultatov meritev. Za hitro in natančno določitev mesta potrebujemo načrt trase in predhodno makrolokacijo.

VI. MEJNE VREDNOSTI

Mejne vrednosti v kablovodih s pripadajočo opremo se razlikujejo glede na tip kabskega elementa. Vrednosti parcialnih praznjenj se s povečevanjem temperature povečujejo. Torej večja kot je temperatura, višje so izgube.

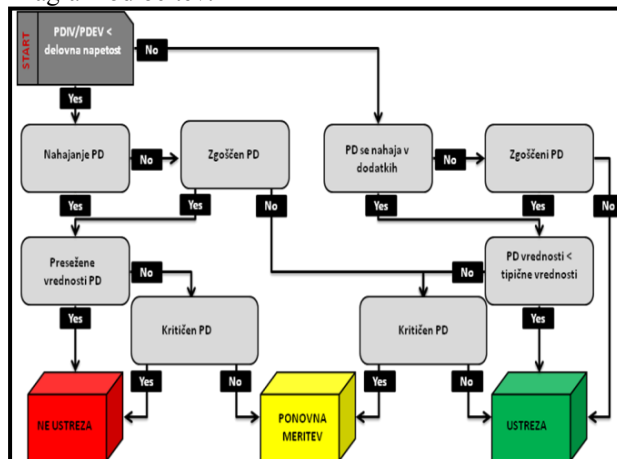
Kabelski element	Tip	Mejne vrednosti
Izolacija	Papir	do 10.000 pC
	XLPE	< 20 pC
Spojke	Oljna izolacija	> 10.000 pC
	Smola	5.000 pC
	Silikon/EPR	500 do 1000 pC
Končniki	Oljni	6.000 pC
	Suhi	3.500 pC
	Shrink	250 pC

Tabela 2: Mejne vrednosti glede na tip kabelskih elementov
Vir: Noul NL; Statistic from Noun Alkmaar

Količina odkritih parcialnih praznitev se razlikuje glede na napetostni nivo. Napetostni preizkus se začne izvajati pri U_0 in postopoma dviguje do $1,7 U_0$, za nove kable pa lahko tudi do $2U_0$.

Na podlagi merilnih rezultatov lahko ugotovimo v kakšnem stanju je kablovod oz. kje prihaja do povečanih vrednosti parcialnih praznjenj. Za lažjo odločitev nam pomaga prikazani diagram na sliki 3.

Diagram odločitev:

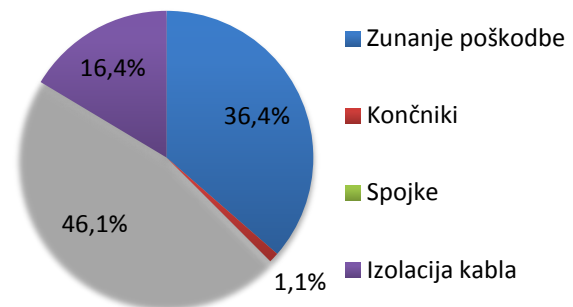


Slika 3: Potek meritev parcialnih praznjenj kablovoda

VII. NAPAKE NA KABLOVODIH IN PRIPADAJOČI OPREMI

Več kot 60% napak na kablovodih nam predstavljajo napake na kablovod ali pripadajoči opremi.

Napake na kablovodih

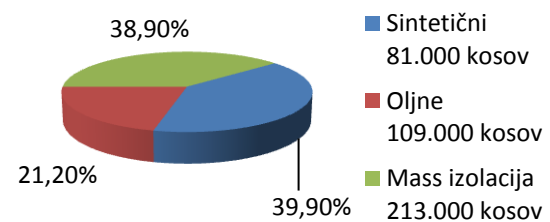


Grafikon 1: Vzroki za poškodbe na kablovodih in kabelskem priboru

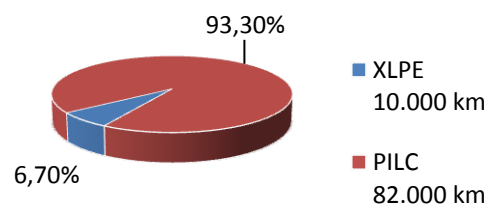
V energetskega sistema imamo dve glavni vrsti napajalnih kablovodov in sicer: papirno/oljno izolirane - PILC kable in kable izolirane z omrežnim polietilenom - XLPE kable. Od vseh napak, ki se pojavijo na kablovodih, jih je kar 93% na PILC kablovodih, ostalih 7% okvar se pojavi na XLPE kablovodih. Vendar je potrebno upoštevati tudi dejstvo, da je PILC kablovodov v povprečju 8-krat več.

Kabelske spojke delimo v tri kategorije, ki temeljijo na vrsti uporabljene izolacije: mas, olje in sintetični.

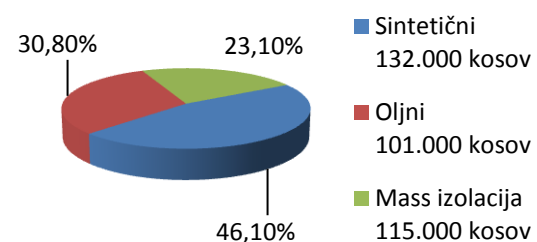
Le okoli 1% napak na celotnih kablovodih se pojavi na kabelskih zaključkih. Le-te lahko zaradi dostopnosti redno pregledujemo in ustrezno vzdržujemo.



Grafikon 2: Delež napak na kabelskih spojkah glede na vrsto



Grafikon 3: Delež napak glede na vrsto izolacije



Grafikon 4: Delež napak na kabelskih končnikih glede na vrsto

Povečano tveganje za napake pri postavitvi ali zamenjavi kabla in še posebej pri montaži kabelskih dodatkov pomeni človeški faktor. Težave se pojavijo pri netočnih montažah, ki imajo lahko kasneje za posledico napake na izolaciji ali priboru. Za montažo kabelskega pribora je nujna strokovnost in natančnost izvajalca. Kljub temu so še vedno možne manjše napake zaradi vremena, tal in zračnega pritiska, ki lahko privedejo do okvare na srednje dolgi rok. Človeške napake se da učinkovito zmanjšati z ustreznimi navodili, zasnovo, proizvodnjo in pravilno montažo. Ne glede na to človeška ravnanja vedno prinesejo nove napake v sistemu, ki jih ni mogoče nikoli popolnoma izključiti. V povprečju je pri 15% vseh napak na kablovodih, ki imajo za posledico izpad, povzročitelj človeški faktor.

Dejavniki napak na kablilih:

	NAPAKA	VZROK
Pribor	Težave vmesnika	Operacija & človek
	Izbokline na konektorjih	Človek
	Vdor vlage	Operacija & človek
	Razpoke	Operacija & človek
	Ostala polprevodna plast	Človek
	Problemi prevodnika	Operacija, okolje & človek
	Območje razvrščanja gibanja	Človek
Izolacija	Prodor vlage	Okolje & človek
	Vdolbine (razlojevanje)	Operacija & človek
	Vodna drevesca	Okolje & človek

Tabela 3: dejavniki za napake na XLPE kablilih

	NAPAKA	VZROK
Pribor	Zmanjšanje ravni olja	Operacija
	Izbokline na konektorjih	Človek
	Prodor vlage	Operacija, okolje & človek
	Vdolbine/reže	Operacija & človek
	Slabo utrjene smole	Človek
	Asimetrična postavitve vodnikov	Operacija & človek
	Problemi prevodnika	Operacija, okolje & človek
Izolacija	Izsuševanje	Operacija
	Vdolbine	Operacija & človek (upogibanje)
	Prodor vlage (perforacije)	Okolje & človek
	Prodor vlage (korozija)	Okolje

Tabela 4: dejavnik za napake na PILC kablilih

Vdolbine v izolaciji kabla:

Preoblikovanje ali krčenje izolacije se lahko pojavi pri proizvajalcu (običajno znotraj izolacije) ali pri namestitvi. Zaradi napačne montaže lahko pride do prevelikih krčenj izolacije. V tako nastalih vdolbinah se poveča dejavnost parcialnih praznjenj, kar poveča razgradnjo materiala. Izolacijsko poslabšanje v vdolbinah lahko traja mesece ali celo leta.

Slabo utrjena smola:

Smola za kabelski pribor, se iz različnih komponent zmeša na mestu montaže. V primeru, da so zmesi v različnem času nepravilno zmešane, lahko pride do povzročitve vdolbin in razpok, ki povzročijo dejavnost parcialnih praznjenj.

Asimetrični položaj:

Zaradi asimetričnega položaja kabla bo le-ta ustvaril večjo poljsko jakost. V kombinaciji z drugimi pomanjkljivostmi, kot so vdolbine ali prodor vlage lahko na teh delih pride do preboja.

Slaba namestitvev tulca:

Za povezovanje kablov se uporabljajo kompresijski tulci, ki so lahko zaradi mehanskih obremenitev (operacije ali okolja) nepopolni. Zaradi uporovih izgub se začnejo slabe povezave segrevati. Pregrevanje na teh delih lahko povzroči razpoke, zlasti v trdih materialih, kar pripelje do aktivnosti parcialnih praznjenj.

Polprevodna plast:

Ob izdelavi spojke ali končnikov je potrebno natančno odstraniti polprevodno plast. V nasprotnem primeru prihaja do preskokov oz. praznjenj. Zaradi napačnega zaključevanja poljske jakosti, prihaja do pregrevanj in s tem zmanjševanja dielektrične trdnosti kabla. To se kaže s povečano količino parcialnih praznjenj.

Vdor vlage:

Vdor vlage v izolacijo je odvisen od okoljskih razmer ali zunanjih poškodb. Dielektrična trdnost kabla iz impregniranega papirja ima lahko prisotnost vlage do 1%. Do te vrednosti se dielektrična vrednost skoraj ne spreminja, nad to pa začne strmo padati. Parcialna praznjenja je moč zaznati pri prisotnosti vlage že okoli 0.1%. Na mestih kjer so parcialna praznjenja povečana, se povečuje temperatura, kar pripelje do krhkosti in spremembe strukture papirja. Plasti papirja so manj odporne na parcialna praznjenja.

Vodna drevesca:

Zaradi prisotnosti vode, električnega polja in temperature v izolacijskem materialu, pride do sprememb v sintetičnih izolacijskih materialih. Vodna drevesca, ki pri tem nastanejo rastejo predvsem v smeri električnega polja. Ko vodna drevesca presežejo kritično mejo preidejo v električna drevesca, lahko rastejo samo nekaj minut, nato pa sledi razelektritev.

Nečistoče v olju:

Dielektrična trdnost olja je odvisna od nečistoč, ki se nahajajo v olju: kovinski prah, celulozna vlakna, in raztopljeni plini so velikega pomena za lastnosti izolacijske trdnosti. Zaradi lokalnih praznjenj prihaja do pregrevanj in sproščanja plinov.

Tip napake	PILC pribor	PILC izolacija	XLPE pribor	XLPE izolacija
Asimetrična postavitev vodnikov	X			
Slabo utrjena smola	X			
Vdolbine, razpoke	X	X	X	X
Zmanjšanje količine olja	X			
Sušenje izolacije		X		
Razvrščanje ele. poljske jakosti			X	
Namestitev tulca			X	
Vdor vlage	X	X	X	X
Izbokline na konektorju			X	
Polprevodna plast			X	
Vodna drevesca				X

Tabela 5: Tipične napake na kabl in kabelskem priboru

VIII. EKONOMSKA PRIMERJAVA STROŠKOV VZDRŽEVANJA

Ugotovili smo, da je ocena stanja kablovoda zanimiva s tehničnega vidika. V praksi pa je potrebno analizirati še nastale stroške. Za boljšo predstavbo je potrebno izdelati primerjavo med korektivnim vzdrževanjem in vzdrževanjem glede na stanje, ki temelji na diagnostiki kabla.

Za izračun nastalih stroškov ob korektivnem vzdrževanju potrebujemo podatke o izgubi moči ob okvari, čas remonta okvare, strošek nedobavljene energije ter stroški popravila.

$$C_{\text{kore}} = P_{\text{moči}} * t * C_{\text{nedobavljene}} + C_{\text{popravila}}$$

V večini držav obstajajo standardne kazni, ki jih določi vlada za nedobavljeno energijo. Odškodninski zahtevki so različni glede na vrsto priključkov. Okvirna nadomestila za industrijo znašajo okoli 10€ na nedobavljeno kWh in za gospodinjstva 1€ na kWh.

Na Nizozemskem je odškodninski zahtevek lahko vložen, če je prekinitev dobave električne energije daljša od 4h.

Napetostni odjem	Tip odjemalca	Nadomestilo
U > 1kV	Gospodinjstvo	35 €
1 < U < 25kV	Mala industrija	900 €
U > 35kV	Velika industrija	90.000€

Stroške za vzdrževanje glede na oceno stanja kablovoda lahko izračunamo z seštevanjem sledečih stroškov. Potrebujemo čas vožnje in čas potrebnih preklopov na omrežju za izvajanje meritev (C preklopov). Upoštevati je

potrebno stroške amortizacije (C amortizacije) naprave ter porabljen čas za meritev (C meritev). Za dokončno določitev stroškov pa potrebujemo tudi strošek odprave napake (C popravila). Na podlagi pridobljenih podatkov lahko izračunamo po sledeči enačbi:

$$C_{\text{preklopov}} = C_{\text{dela}} * t_{\text{preklopov}}$$

$$C_{\text{meritev}} = C_{\text{dela}} * t_{\text{meritev}}$$

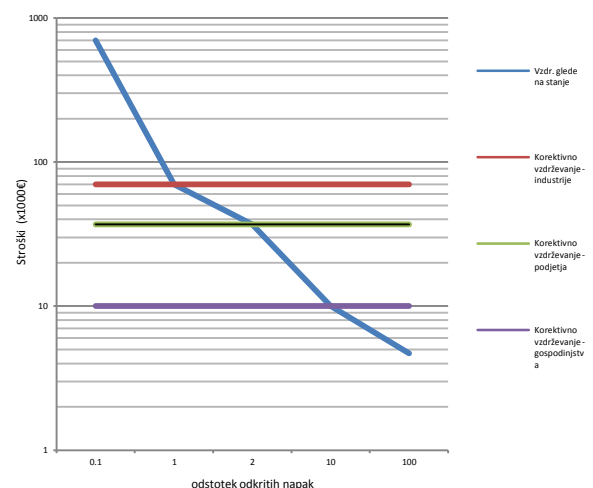
$$C_{\text{opreme}} = \frac{C_{\text{nakupa}}}{t_{\text{amortizacije}}} * \frac{1}{\text{št. mer./leto}}$$

$$C_{\text{gl.na stanje}} = \left(\frac{C_{\text{preklopov}} + C_{\text{meritev}} + C_{\text{opreme}}}{\text{št. napak}} \right) + C_{\text{popravkov}}$$

Primerjavo stroškov med načinoma vzdrževanja kablov, prikažemo kot funkcijo števila najdenih kabelskih defektov. Stroški korektivnega vzdrževanja so prikazani pri treh različnih povezavah, za katere sta povprečna vrednost o izgubi moči ob okvari in čas remonta okvare znana (prekinitev dobave električne energije za velike industrije = 6000 kWh, za male industrije = 3000 kWh in za gospodinjstva = 3000 kWh).

Prelomne točke učinkovitosti diagnostičnih orodij tako določimo za posamezne povezave. Za velike industrije je učinkovitost vzdrževanja glede na stanje kablovoda večja, kot pri drugih dveh. Točka preloma za velike industrije prikazuje, da je tak način vzdrževanja stroškovno učinkovit, če odkrijemo in preprečimo potencialne defekte pri več kot 1 od 100-ih testiranih kablov. Zanimive rezultate nam pokaže ekonomska analiza tudi drugih dveh kategorij, in sicer, da je vzdrževanje glede na stanje kablovoda pri malih industrijah in gospodinjstvih ekonomsko upravičeno, če odkrijemo več kot 2%, oz. 10% potencialnih defektov. Podatki za izračun stroškov vzdrževanja glede na oceno stanja so sledeči.

C dela	t preklopov	t meritev	C nakupa	t amortiz.	Št. mer./leto	C popravila	C popravkov
70€/ur	2 uri	4 ure	65.000€	5 let	150	7.000€	2.000€



IX. ZAKLJUČEK

Z ustreznimi preventivnimi ukrepi, diagnostičnimi meritvami torej lahko zmanjšamo stroške vzdrževanja, podaljšamo življenjsko dobo kabla in zmanjšamo število nepredvidenih izpadov električne energije. Ob strokovnem izvajanju meritev lahko dobimo nabor podatkov o napakah na kablilih, njihovi lokaciji in previden čas za sanacijo napake, preden le-ta povzroči izpad. Podatki pokažejo tudi možne vzroke napake – človeški faktor ali okolje. S pravim pristopom lahko s korektivnimi ukrepi možnosti napake v prihodnje zmanjšamo oziroma jih predvidimo in ukrepamo pred izpadom.

S standardiziranimi merilnimi metodami lahko določimo lokacijo in resnost napake. Izčrpno vedenje o stanju kablov v kabelskem omrežju lastniku oziroma upravljavcu omrežja omogoča vzpostavitev sistema preventivnega vzdrževanja glede na stanje. To pomeni boljšo osnovo za načrtovanje stroškov vzdrževanja, manj izpadov in nezadovoljnih strank ter pri določenem številu najdenih okvar tudi bistven prihranek pri stroških vzdrževanja. V primeru zavezanosti k odškodninam bi bil ta prihranek še bistveno bolj očiten in v primerjavi s preventivnim vzdrževanjem po časovnih presledkih bolj ekonomičen.

Ne glede na tip napake ali vzrok zanjo lahko z naborom predstavljenih merilnih metod preverimo nove kable po polaganju, in že položene kable. Ugotovljeno stanje kabla bo pripomoglo k odločitvam o investicijskem in rednem vzdrževanju, kar bo imelo za posledico boljše planiranje stroškov in boljše usklajen denarni tok.

Z zmanjšanjem števila nepredvidenih okvar v omrežju bodo lahko upravljavci zmanjšali tudi upad dohodka zaradi nedobavljene električne energije in nezaračunane omrežnine. Torej bi lahko povečali prihodkovno stran, ne samo zmanjšali stroške.

X. VIRI

- [1] F.J. Wester, Condition Assessment of power cables using partial discharge diagnosis at damped AC voltages, Rotterdam, 2004.
- [2] M. Janša, Pregled metod za preskušanje energetskih kablov z izolacijo iz umetnih mas po polaganju v skladu z CENELEC in IEC standardi ter njihova uporaba v praksi, CIGRE, Portorož, 2003.
- [3] E. F. Steennis, Water treeing; the behaviour of water trees in extruded cable insulation, Kema, Netherlands, 1989.
- [4] N. Vrandečić, Metode vrednovanja rezultata dijagnostike parcialnih izboja u kabelima, CIGRE, Cavtat, 2009.
- [5] E. Gulski, F.J. Wester, J. Smit, E. Groot, M. Van vliet, Sensitivity aspects of on-line pd diagnosis on MV power cable, Cired, 2003.

- [6] Nuon, Defecten analyse technieken, Internal Document NUON, 2004.
- [7] D. Pepper, W. Kalkner, PD-measurement of typical defect on XLPE insulation cables at variable frequencies, Montreal, 1997.
- [8] SEBA KMT, OWTS PD- Diagnosis, Baunach, 2008.