

KOMPOZITNI POLIMERNI IZOLATORI U PRIJENOSU I DISTRIBUCIJI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Prof. dr. sc. Zijad H a z n a d a r, Zagreb – prof. dr. sc. Kemo S o k o l i j a, Sarajevo – prof. dr. sc. Sead B e r b e r o v i ć – prof. dr. sc. Željko Š t i h, Zagreb

UDK 621.315/316:621.315.62
PREGLEDNI ČLANAK

Prikazana je kratka povijest razvoja kompozitnih izolatora. Načinjen je pregled prednosti i nedostataka konvencionalnih izolatora (stakleni i porculanski) i kompozitnih polimernih izolatora. Nakon toga, prikazana je analiza i usporedba konvencionalnih i kompozitnih polimernih izolatora glede njihovih mehaničkih i električkih karakteristika, ponašanja u otežanim uvjetima rada, te ekonomska usporedba na temelju podataka objavljenih u svjetskoj literaturi. Na kraju su diskutirana i neka, još uvijek, otvorena pitanja vezana za primjenu kompozitnih polimernih izolatora u prijenosu i distribuciji električne energije.

Ključne riječi: konvencionalni izolatori, kompozitni polimerni izolatori, izolatori od silikonske gume, starenje.

1. UVOD

Visokonaponski izolatori vanjske montaže izrađeni od porculana i stakla (jednim imenom nazvani konvencionalni izolatori) imaju iza sebe povijest koja traje više od jednog stoljeća, dok se povijest kompozitnih polimernih izolatora svodi na proteklih tridesetak godina. Prva generacija polimernih izolatora (monolitni epoksid, odnosno prve varijante danas već klasične konstrukcije izolatora s fiberglasnom jezgrom prekrivene polimernim kućištem) nije pružila očekivani životni vijek u eksploataciji. Premda su se iduće generacije ovih izolatora dokazale u vremenu što je skoro jednako vremenu prihvatljivom za konvencionalne izolatore – trideset godina – mnogi su korisnici visokonaponske opreme i danas skeptični glede dugoročnih osobina polimernih izolacijskih materijala. Tu su također i drugi razlozi pa veliki broj korisnika, posebice u Europi, nastavlja s korištenjem konvencionalnih izolatora: povjerenje u proizvod temeljen na povijesnom iskustvu, mogućnost da se na tržištu nabave konvencionalni izolatori dobre kakvoće, konkurentnost glede vremena isporuke i cijene. Pored toga tu su i drugi ne manje bitni razlozi:

- Postoje internacionalni i nacionalni standardi i vlastite tehničke specifikacije kod većine korisnika.
- Nije bilo radikalnih ni čestih promjena u materijalu, dizajnu pričvršćivanja metalnih armatura, kao ni u procesu proizvodnje.
- Zbog visoke razine međunarodne standardizacije konvencionalnih izolatora, kod zamjene oštećenih jedinica mogu se koristiti proizvodi drugih proizvođača.
- Relativno jednostavna identifikacija defektnih jedinica.

Od vremena kad su uvedeni (sedamdesetih godina prošlog stoljeća) kompozitni polimerni izolatori znatno su napredovali, kako glede korištenih materijala, dizajna, procesa proizvodnje, tako i glede njihove pouzdanosti. Cijena kompozitnih polimernih izolatora je pala, a s kraćim rokovima isporuke oni su postali konkurentni konvencionalnim izolatorima. Danas su, u prvom redu zbog smanjenja težine izolatora, dalekovodi na kojima su instalirani kompozitni polimerni izolatori, posebice dalekovodi viših napona, jeftiniji od onih čije vodiče nose konvencionalni izolatori. Veliki broj korisnika, proizvođača, industrijskih asocijacija, istraživačkih instituta i sveučilišta aktivno je uključeno u istraživanje i razvoj testova starenja polimernih kompozitnih izolatora, kako bi se ustvrdila korelacija između starenja u laboratoriju i ponašanja u realnim pogonskim uvjetima.

Problem ostaje u činjenici što proizvođači nastavljaju sa stalnim promjenama dizajna, kompozicije materijala, načina pričvršćivanja armatura kao i samog procesa proizvodnje. To je razlogom pa neki korisnici još uvijek nisu posve spremni prijeći na kompozitne polimerne izolatore, iako se bez sumnje radi o jednoj veoma kvalitetnoj tehnologiji.

1.1. Konvencionalni izolatori

Kao materijali koji su dokazali sposobnost da se odupru starenju u uvjetima ambijenta, keramike (posebice porculan) našle su primjenu u širokom spektru aplikacija. S druge strane, primjena keramika diktira glomazne i teške konstrukcije, podložne pucanju pri rukovanju i transportu, te vandalizmu tijekom

eksploatacije. Tu je također i njihova relativno slaba otpornost na preskok u uvjetima onečišćene atmosfere. Sve ovo govori o tome da, usprkos mnogim prednostima keramika, pouzdanost elektroenergetskog sustava još uvijek trpi zbog njihovih nedostataka.

1.1.1. Prednosti primjene keramike

(i) Stabilnost

Generalno se može kazati da su keramike karakterizirane jakim ionskim vezama i blisko pakiranim atomima (silicij i kisik, kvarcni pijesak i silikati). To im daje veliku stabilnost i otpornost na starenje pod utjecajem UV zračenja, površinskih pražnjenja, vlaženja itd.

(ii) Mehanička čvrstoća

Rigidna priroda keramičkih materijala ima za posljedicu značajnu mehaničku čvrstoću, tako da se izolatori izrađeni na toj osnovi mogu koristiti kako u situacijama kad na njih djeluju naprezanja na vlak, tako i u onim kad se ima i naprezanja na savijanje. Porculanska kućišta koja se koriste kod kablskih glava, provodnih izolatora i odvodnika prenapona su samopodrživa, tako da ne zahtijevaju druge materijale ili komponente kako bi se postigla tražena čvrstoća.

(iii) Jeftine sirovine

Osnovne sirovine koje se koriste za proizvodnju porculana, kao što su gline, feldspat i kvarc, relativno su jeftine i raspoložive.

1.1.2. Nedostaci kod primjene keramike

(i) Proizvodnja i vrijeme isporuke

Proces proizvodnje porculana sastoji se iz niza faza. Kad se radi o velikim kućištima potreban je dugotrajan period za sniženje sadržaja vode u ekstrudiranoj jezgri prije nego se pristupi njihovom oblikovanju i pečenju. Rezultat toga jesu duga vremena isporuke.

(ii) Lomljivost

Keramike su veoma lomljive, tako da su konvencionalni izolatori prilikom korištenja, transporta ili instaliranja podložni pucanju. S druge strane, vandalizam često predstavlja jedan od značajnih uzročnika mehaničkih oštećenja u pogonu. Opća je praksa da se prilikom kupovine porculanskih izolatora u cijenu uključi faktor loma, što naravno dovodi do porasta jedinične cijene proizvoda.

(iii) Težina

Zbog velike specifične gustoće keramike, tijela konvencionalnih izolatora su veoma teška. S porastom naponskog nivoa javljaju se problemi vezani uz upravljanje teškim porculanskim konstrukcijama: osim što je često potrebna primjena dizalica, potrebne su i skupe i masivne strukturalne potpore. Glomaznost i velika težina porculanskih proizvoda obično diktiraju jeftiniji, ali dugotrajniji transport radi sniženja troškova. To, s druge strane, produljuje vrijeme isporuke.

(iv) Kvar na šupljim porculanskim kućištima

Šuplja porculanska kućišta za provodne izolatore, mjerne transformatore, prekidače, kablške glave i odvodnike prenapona mogu, kod unutarnjeg proboja, doživjeti havariju. Naime, kod pojave unutarnjeg luka snage dolazi do brzog porasta tlaka. Ako se ovaj tlak ne oduši prije nego što dostigne čvrstoću kućišta na pucanje, kućište se može skršiti. Kad se to dogodi, komadi porculana, koji nose veoma veliku silu, razletjet će se na sve strane u okolici aparata. Ovaj tip kvara je veoma poznat, naročito kod distributivnih odvodnika prenapona.

(v) Svojstva u uvjetima onečišćenja

Stabilne kemijske veze keramičkih materijala znače također da oni posjeduju veliku slobodnu površinsku energiju, što istodobno znači veliku površinsku adheziju glede onečišćenja što je prisutno u okolišu. Zbog velike slobodne površinske energije keramike se lako vlaže, a tako prisutna voda formira filmove na pojedinim dijelovima površine izolatora. Materijali s takvim karakteristikama poznati su kao "hidrofilni" materijali.

Hidrofilne se površine ne ponašaju dobro u uvjetima onečišćene atmosfere. Vodeni filmovi rastvaraju vodljive onečišćivače, što snizuje ukupni površinski otpor izolacije i dovodi do stvaranja vodljivih elektrolita duž kontinuirane staze, tj. do začinjanja procesa preskoka.

1.2. Polimerna izolacija

Kao što je već rečeno, prvi polimerni izolatori nisu imali očekivanu životnu dob, u prvom redu zbog neadekvatne otpornosti na UV-zračenje, habanje i hidrolizu. Mnogi korisnici elektroopreme u svijetu su i danas rezervirani kad je u pitanju dugoročno ponašanje kompozitnih izolatora, upravo iz razloga što su prvi izolatori doživjeli kvarove već nakon veoma kratkog vremena eksploatacije.

Polimerni materijali visokih svojstava koriste se u tehnologiji visokonaponskih izolatora već više od trideset godina. Tijekom ovog perioda njihova primjena je stalno rasla, tako da danas polimeri postaju osnovni materijali za vanjsku izolaciju. Oni su u općoj primjeni kad je riječ o kablskim glavama, odvodnicima prenapona, izolatorima za nadzemne vodove, sabirničkim izolatorima i provodnim izolatorima.

1.2.1. Prednosti primjene polimera

(i) Manja težina

Gustoća polimernih materijala je mnogo niža od gustoće keramika što za posljedicu ima značajno sniženje težine proizvoda. Ova se razlika povećava s povišenjem naponske razine. Kompozitni polimerni izolatori ne zahtijevaju primjenu kranova ili drugih uređaja kod korištenja i instaliranja. Smanjena težina omogućuje primjenu lakših i jeftinijih stupova i

konstrukcija za montažu. Tu su također i niži troškovi transporta u odnosu na ekvivalentne keramičke izolatore. Kompozitni polimerni izolatori su u prednosti glede njihove primjene u gusto naseljenim područjima pošto omogućavaju primjenu užih koridora za dalekovode. Zahvaljujući visokom omjeru čvrstoća/težina omogućena je primjena duljih raspona i jeftinijih stupova, kao i poboljšanje vizualnog izgleda dalekovoda. Kompozitni polimerni izolatori pružaju mogućnost projektiranja novih kompaktnih dalekovoda sa sniženim elektromagnetskim utjecajima.

(ii) Fleksibilnost

Za razliku od porculanskih dalekovodnih potpornih izolatora koji, zbog krhke naravi porculana, ne omogućuju bilo kakvo ugibanje (deflekciju), kompozitni polimerni izolatori, zahvaljujući svojstvima svoje fiberglasne jezgre, predstavljaju veoma fleksibilne strukture.

Neelastičnost porculanskih potpornih izolatora predstavlja veoma veliki problem kad se radi o događajima koji dovode do pojave iznenadnih promjena u mehaničkom opterećenju: pucanje vodiča, padanje leda s vodiča, udar vozila u stup, udarci vjetra... Posljedice ovih događaja mogu biti katastrofalne: pucanje izolatora i pad vodiča dovode do pucanja izolatora na sljedećem stupu i tako redom – kaskadni kvar. Na koncu imamo situaciju u kojoj se kilometri dalekovodnog užeta nalaze na zemlji. Fleksibilnost kompozitnih polimernih izolatora štiti dalekovode od ovakvih događaja, omogućujući istodobno postizanje svih prednosti što ih u projektiranje dalekovoda unosi koncept primjena potpornih izolatora (kompaktiranje, podizanje naponskog nivoa postojećih dalekovoda, sniženje radiosmetnji, neprobojnost izolatora, estetski aspekt...).

(iii) Geometrija

Pošto se polimerna izolatorska kućišta proizvode najčešće u postupku prešanja, jasno je kako nije teško proizvesti jedinice koje za istu cijenu imaju veću kliznu stazu po jedinici duljine od one što se ima kod konvencionalnih izolatora. Isto tako, jasno je da se bez većih ekonomskih i problema u proizvodnji mogu postići mnogo složeniji profili rebara. Danas se često primjenjuje konstrukcija s promjenjivim rebrima (veliko-malo), koja omogućava poboljšanje preskočnih karakteristika u vlažnim uvjetima – sprječava se istodobno premoštavanje svih rebara.

(iv) Svojstva u uvjetima onečišćenja

Tipični polimerni materijali koji se koriste u izolatorima za vanjsku montažu imaju nisku slobodnu površinsku energiju. Kad su novi i prije nego što budu izloženi djelovanju okoliša, polimerni materijali su otporni na vlagu – prirodno im je svojstvo hidrofobnosti. Veoma je poželjno da se ovo svojstvo zadrži i tijekom njihovog izlaganja utjecajima okoliša, tj. da ga prenesu na nataloženi sloj zagađivača. Na površini izo-

latora načinjenih od takvih materijala, voda formira vodene kapljice (kuglice), tako da postoji diskontinuitet rastvorenog vodljivog onečišćivača. Rezultat je manja klizna struja i smanjena vjerojatnost nastanka suhih zona, odnosno viši napon potreban da prouzroči preskok. U usporedbi s porculanom i staklom, neki polimerni materijali imaju veću otpornost na preskok i u prilikama kad se radi o površinama koje pokazuju znake starenja.

(v) Kvar kod šupljeg kućišta

Kod polimernih šupljih izolatora radi se o posve drukčijim posljedicama kvara izazvanog unutarnjim lukom u odnosu na porculan. Fizička svojstva polimernih materijala jasno govore da se on neće skršiti kao porculan, nego će doći do probijanja ili pucanja strukture i odušivanja unutarnjeg tlaka. Rezultat je vanjski preskok i oslobođenje energije kvara izvan kućišta.

(vi) Proizvodnja

Proces proizvodnje polimernih proizvoda je u biti kraći od onog kod keramika. Tipično trajanje prešanja je reda minuta, tako da je vrijeme isporuke znatno kraće nego kod uređaja na bazi keramika.

1.2.2. Nedostaci kod primjene polimera

(i) Degradacija u uvjetima ambijenta

Polimerni materijali imaju slabije unutarnje veze nego porculan (kovalentne umjesto ionskih), tako da su, pod djelovanjem višestrukih naprezanja što ih susrećemo u eksploataciji, podložni promjenama – starenju. Međutim, ako se radi o dobro razvijenom materijalu i konstrukciji, kompozitni izolatori mogu dostići dobra svojstva koja su sposobni održati tijekom željene životne dobi. Da bi se to postiglo potrebno je ostvariti složeno optimiranje formulacije polimera i dizajna izolatora. To znači da se mora posjedovati *know-how* glede izbora vrste i koncentracije punila i aditiva, kao i korištenja podesnih metoda miješanja prilikom realizacije kompaunda. Uvjeti što se imaju u proizvodnom procesu moraju biti takvi da je osigurana zaštita od degradacije kompaunda tijekom odvijanja ovog procesa. Formulacija kompaunda predstavlja veoma složen proces optimiranja za koji je potrebno dugotrajno eksperimentiranje i ispitivanje. Formulacije mogu varirati u širokoj skali što podrazumijeva sadržaj osnovnog polimera između 20% i 80% (težinski). Aditivi se koriste radi poboljšanja električkih i mehaničkih svojstava: antioksidanti, plastifikatori, pigmenti, agensi za pospješivanje procesa proizvodnje, katalizatori, amortizeri plamena, UV-stabilizatori, sredstva za sprječavanje stvaranja tragova i erozije i drugi, ovisno o specifičnoj formulaciji. U mnogim situacijama, aditivi su ti koji, kolektivno i pojedinačno, svojim svojstvima određuju sveukupne karakteristike materijala.

Struktura polimernih materijala koja pruža fleksibilne veze i mobilnost dugih lanaca je ta koja omogućuje postizanje mnogih, polimerima svojstvenih, prednosti.

Međutim, budući da su sve formulacije polimernih materijala organske prirode, kontinuirano pogonsko naprezanje može dovesti do slabljenja površinskih svojstava i slabljenja karakteristika u uvjetima onečišćenja, unatoč tome što su polimeri pojačani odgovarajućim aditivima, a kućište konstruirano tako da ograniči kliznu struju. Prema tome, za postizanje visoke razine svojstava u različitim primjenama, potrebno je postići kombinaciju znanosti o materijalima, pogonskih ekspertiza i visoke razine procesa proizvodnje u ovom području.

Pogonska naprezanja, kao što su korona pražnjenja, UV-zračenje ili kemijski napadi, dovode do kemijskih reakcija na površini polimera. Jedan od rezultata ovih reakcija je formiranje hidrofilnih grupa koje će omogućiti vlaženje površine i porast klizne struje. Materijal koji je doživio sniženje hidrofobičnosti ne mora se nužno nastaviti mijenjati odnosno trpjeti napadaje *trackinga* i erozije u uvjetima vlaženja. Zadržavanje svojstva hidrofobičnosti je, međutim, jako poželjno. Ako dođe do njenog sniženja, preko površine izolatora ne smiju proteći kritične klizne struje koje će dovesti do formiranja suhih zona. Ako se formiraju suhe zone, formulacija materijala mora biti takva da se odupre *trackingu* i eroziji. Dizajn kućišta može u ovim uvjetima utjecati na veličinu klizne struje. Na osnovi izloženog možemo zaključiti da postoje tri razine zaštite od starenja i znatnih oštećenja površine, odnosno kompletnog kompozitnog polimernog izolatora.

(ii) Visoke cijene sirovina

Cijene koštanja sirovina za izradu kompozitnih polimernih izolatora znatno su više od cijena sirovina za proizvodnju porculana i stakla. Punila i aditivi miješaju se s baznim polimerom ne samo kako bi se snizili troškovi, nego i da se poboljšaju svojstva i olakša proces izrade. Bazni polimer može biti konstituent kompaunda u iznosu 20% do 80% težine. Prema tome, stvarne formulacije kompaunda u kojima se deklarira jedan te isti bazni polimer su različite, što ima izravnog utjecaja na svojstva. Na današnjem visokokonzekurentnom tržištu proizvođači traže načina da prednost, tj. nižu cijenu, steknu kroz reformuliranje materijala. Novije generacije materijala mogu biti i neispitane, a prethodno pogonsko iskustvo ne može biti nikakva garancija za ponašanje jedne posve drukčije formulacije.

2. RAZVOJ KOMPOZITNIH IZOLATORA

Premda javno mnijenje, pokazujući povećani interes za okolišem, sve više utječe i na tehnologiju prijenosa i distribucije električne energije, posve je jasno da će, zahvaljujući prednostima što ih nude, visokonaponski nadzemni vodovi, posebice kad se radi o ekstra i ultravisokim naponima, biti prisutni barem i u prvim desetljećima novog tisućljeća. Ovakva ocjena utemeljena je ponajprije na razlozima ekonomske naravi: ka-

belski vodovi su, samo glede kapitalnih troškova, više-kratno skuplji od nadzemnih. Tu su također i tehničke prednosti nadzemnih vodova: visoka pouzdanost, jednostavnija izolacija, nepostojanje problema hlađenja, niži nivo gubitaka, jednostavnije instaliranje, jednostavnija detekcija kvarova, održavanje itd. Prema tome, posve je jasno da će se kompanije koje gospodare u oblasti prijenosa i distribucije električne energije unaprijed odlučiti za vanjske visokonaponske vodove, a za kabelsku tehnologiju opredijeliti samo u slučajevima kad to konkretni uvjeti beskompromisno i definitivno zahtijevaju.

Što je, međutim, s pitanjem uklapanja nadzemnih vodova u okoliš? U nekim dijelovima USA i u Europi također, već su na snazi takva ograničenja, koja, kako glede visine stupova, tako i izbora izolatora, omogućuju prihvaćanje samo onih konstrukcija za koje se može utvrditi da su nezamjetljive. Osvrnuvši se na dva veoma bitna aspekta uloge koju su u ovom pogledu odigrali kompozitni polimerni izolatori, nije teško uvjeriti se kako bi ovi zahtjevi bili danas potpuno ne-realni da je industrija izolatora ostala na konvencionalnim materijalima – porculanu i staklu. Radi se, naime, o sljedećim pitanjima:

- estetski aspekt – izgled samih izolatora i izgled kompaktiranog dalekovoda u odnosu na njihove ekvivalente realizirane u konvencionalnoj tehnologiji;
- primjena specijalnih konstrukcija stupova koji su: niži od konvencionalnih, manje upadljivi u odnosu na konvencionalne i više nalik prirodnim formama (drveću na primjer).

Ovi učinci prodora nove tehnologije u područje vanjske visokonaponske izolacije predstavljaju, međutim, samo kolateralne učinke u odnosu na ciljeve razvoja što su ih, u vremenu opće opsjednutosti naponima reda tisuću kilovolti, pred sebe postavili industrija izolatora i korisnici visokonaponske elektroopreme. Porculan i staklo postigli su posve afirmirane performanse u doba kad je gornja granica prijenosnog napona bila 230 kV, gdje se na primjer s dvanaest standardnih kapastih članaka po fazi u izolatorskom lancu još uvijek nije postavljalo pitanje omjera između mehaničke čvrstoće i težine takvog izolacijskog ansambla. S porastom naponske razine i broja vodiča u snopu pojavio se zahtjev za primjenom dva, odnosno četiri, paralelna lanca, što je značilo 25, 30, 40 ili više izolatorskih članaka po fazi. Pogled u budućnost, koja se tad vidjela kroz prizmu prijenosnog napona 1100 kV, govorio je da će na primjer na jednom zateznom stupu visjeti pet tona porculanskih izolatora ili čak pet puta više na jednom krajnjem stupu. Takve perspektive učinile su da šezdesete i početak sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća postanu ispunjena traganjem za lakšim i jednostavnijim izolatorima, međutim, istodobno sposobnim odgovoriti na stroge električke, ali prije svega, mehaničke zahtjeve zbog kojih su i uvedeni komplicirani paralelni lanci.

Ideju kako postići konstrukciju koja će biti lakša od klasičnog lanca kapastih izolatora nije bilo potrebno posebno razvijati, budući da je bilo jasno da se količina metala, kao nužnog zla u dizajnu kapastog izolatora, može reducirati primjenom lanca dugih štapnih izolatora. No, zbog ograničenja u duljini dugog štapnog izolatora, ponovno je u pitanju lanac i ponovno je tu više metala nego što ga je nužno imati. Tehnologija kompozicije polimerne smole i staklenih vlakana, koja je već bila napravila prodor u drugim područjima inženjerstva, bila je ovdje spasonosno rješenje: nađen je odgovor na mehaničke zahtjeve – jezgra (štap) od smolom ojačanih staklenih vlakana. Tako je postalo jasno da se količina metala može svesti na nužni minimum. Ostao je, međutim, problem udovoljenja električkim zahtjevima – jezgru je trebalo prekriti kućištem od izolacijskog materijala koje će je zaštititi od vanjskih utjecaja i istodobno izolatoru dati nužna svojstva koja mu omogućavaju rad u uvjetima istodobnog djelovanja električkih naprezanja i naprezanja što ih izaziva okoliš.

U takvom ambijentu nastala je koncepcijom šezdesetih i prvom polovinom sedamdesetih godina prva generacija kompozitnih polimernih izolatora, u Njemačkoj, Italiji, USA, Francuskoj i Velikoj Britaniji. Različiti proizvođači koristili su različite vrste baznog polimera za izradu kućišta izolatora: silikonska guma, etilen propilenska guma (EPR – *ethylene propylene rubber*), epoksidna smola i politetrafluoretilen (PTFE). Kako bi se postigla željena svojstva izolatora svaki od ovih baznih materijala kombiniran je s odgovarajućim punilima i aditivima. Metalne armature su s jezgrom spajane primjenom različitih tehnologija – stezanje armatura na jezgru, usađivanje u armaturama prisutnih klinova u jezgru i lijepljenje armatura i jezgre.

Prva generacija kompozitnih polimernih izolatora ponudila je značajne prednosti i proizvela veliki interes među korisnicima. Posebne prednosti u odnosu na konvencionalne izolatore ogledale su se u:

- smanjenju težine – ekonomičniji dizajn novih stupova, odnosno mogućnost da se podigne naponski nivo postojećih sustava uz zadržavanje postojećih stupova; ova činjenica također omogućuje povećanje razmaka između vodiča i zemlje i povećanje razmaka između faza radi sniženja intenziteta električkih i magnetskih polja koja postaju predmetom sve većeg zanimanja javnog mnijenja;
- većem omjeru između mehaničke čvrstoće i težine izolacijskih konstrukcija – mogućnosti primjene duljih razmaka između stupova;
- manjoj podložnosti ozbiljnim oštećenjima zbog vandalizma izazvanog pušćanom vatrom – situacije u kojima dolazi do raspuknuća konvencionalnih izolatora i eventualnog pada vodiča na zemlju;
- značajno poboljšanim performansama u uvjetima onečišćene atmosfere;
- lakšem instaliranju – izbjegnuta uporaba teških dizalica;

- sniženim troškovima održavanja – nema potrebe za pranjem, čišćenjem ili primjenom specijalnih premaza što je redovita praksa kod konvencionalnih izolatora u uvjetima jako onečišćene atmosfere;
- estetskim aspektima – privlačnija pojava omogućuje lakše uklapanje izolatora i dalekovoda u prirodni ambijent.

Navedene prednosti povukle su za sobom sniženje sveukupnih troškova, premda je nabavna cijena ovih izolatora bila u početku viša od cijene njihovih ekvivalenata u konvencionalnoj tehnologiji. U Tablici 1 prikazani su razlozi zbog kojih uvođenje kompozitnih polimernih izolatora dovodi do sniženja sveukupnih troškova izgradnje i održavanja jednog dalekovoda.

Tablica 1. Sniženje troškova zbog uvođenja kompozitnih izolatora [2]

Sniženje troškova zbog promjene konstrukcije i materijala	Sniženje konstrukcijskih troškova	Sniženje troškova održavanja
Manje metalnih dijelova u izolacijskoj konstrukciji	Transportni troškovi, troškovi skladištenja, troškovi oštećenja u transportu	Nepotrebno pranje, čišćenje ili premazivanje i u uvjetima jako onečišćene atmosfere
Moguće sniženje u nabavnoj cijeni u odnosu na konvencionalnu konstrukciju (danas već ostvareno)	Troškovi instaliranja	
Sniženje u cijeni stupova i troškova koridora prilikom uklapanja dalekovoda u okoliš	Uštede zbog smanjenja oštećenja izazvanih grubim upravljanjem	Otpornost na vandalizam (pušćanu vatru)
	Mogućnost montaže uz pomoć helikoptera	

Opisane prednosti bile su razlogom da je veliki broj korisnika širom svijeta odlučio eksperimentirati s kompozitnim polimernim izolatorima, ugrađujući ih na kratkim sekcijama pojedinih dalekovoda i na mjestima gdje su se očekivali ili već imali problemi s konvencionalnim izolatorima. Prva iskustva bila su, međutim, razočaravajuća. Tipični problemi s kojima su se korisnici susreli već nakon nekoliko godina eksploatacije bili su:

- pojave *trackinga* i erozije (*tracking* predstavlja pojavu ireverzibilne degradacije (slabljenja) materijala kućišta prouzročenu pražnjenjima na površini izolatora; ogleda se u formiranju vodljivih karboniziranih staza koje premošćuju međuelektrodni razmak preko površine izolatora; erozija se definira kao ireverzibilna degradacija površine izolatora prouzročena površinskim pražnjenjima koja za rezultat ima gubitak materijala kućišta) materijala kućišta koje za epilog imaju otkaz izolatora;
- stvaranje raspuklina na površini izolatora ili tragova kemijske dekompozicije površine što, olakšavajući

skupljanje onečišćenja, vode ka pojavi površinskih parcijalnih pražnjenja i preskoka na naponima koji su niži od onih koje mogu izdržati novi izolatori;

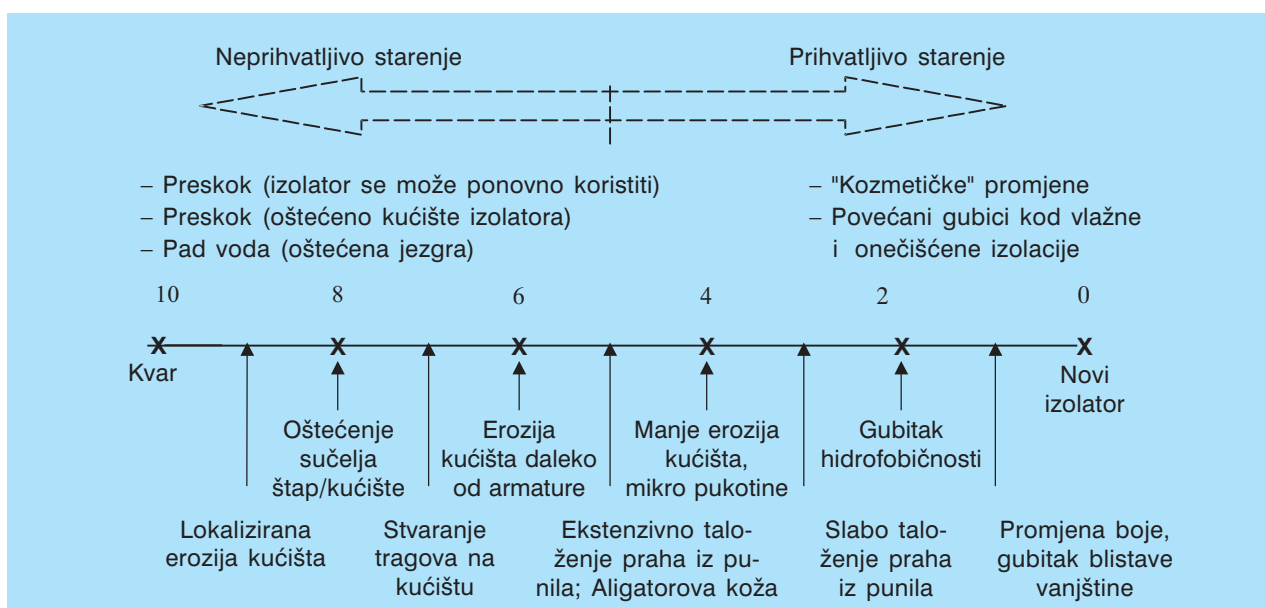
- slabljenje veza s armaturama popraćeno prodorom vode u unutrašnjost izolatora s posljedicama koje se odražavaju u slabljenju električkih i mehaničkih svojstava i kao epilog imaju električki, odnosno najčešće mehanički kvar izolatora.

Ova iskustva upućivala su na zaključak da se, zbog loše konstrukcije, izbora neodgovarajućih materijala i loše kontrole kakvoće radi o proizvodima s ograničenom i znatno nižom životnom dobi od zahtijevane. S obzirom na poteškoće u otkrivanju defekata i nepostojanje korelacije između vrste, odnosno intenziteta defekata i preostale životne dobi izolatora, postavilo se vrlo važnim pitanje procjene trajanja životne dobi kompozitnih polimernih izolatora i s njim vezanog pitanja dugotrajne pouzdanosti dalekovoda na kojima su oni instalirani.

Za razliku od konvencionalnih izolacijskih materijala, kod kojih interakcija električkih naprezanja s utjecajima okoliša (onečišćenje, vlaženje, sunčevo zračenje, toplinski ciklusi itd.), čije su posljedice protjecanje klizne struje i pojave pražnjenja (korona pražnjenja, pražnjenja preko suhih zona i preskok preko površine izolatora), i nakon eventualne pojave preskoka neće ostaviti "dublji tragova", presudnih za njihovo buduće ponašanje, na polimernim materijalima koji se koriste za izradu kućišta kompozitnih polimernih izolatora događaju se često značajne promjene. Bilo da se radi o promjenama koje će dovesti do slabljenja površine, pa tako i do slabljenja svojstava izolatora, ili da su u pitanju samo neznatne, "kozmetičke" promjene u terminologiji koja se ovdje koristi, sve one spadaju pod pojam starenje. Moramo, međutim, praviti razliku između promjena čije pojavljivanje ne dovodi do

nepovratnog drastičnog slabljenja svojstava izolatora, i koje stoga možemo tolerirati (prihvatljivo starenje), i promjena koje dovode do značajnog slabljenja električkog i mehaničkog integriteta izolatora – neprihvatljivo starenje. Na sl. 1. prikazana je *Gorurova karta* starenja kompozitnih polimernih izolatora na kojoj se vide uzroci i posljedice promjena o kojima je ovdje riječ.

Ako se utvrde uzroci problema onda se može naći i rješenje koje će taj problem, ako ne potpuno eliminirati, a ono barem toliko umanjiti njegove negativne učinke do na mjeru ostajanja u domeni onih što ih je moguće tolerirati. To je bio pristup onih proizvođača kompozitnih polimernih izolatora koji su, za razliku od drugih koji su napustili njihovu proizvodnju, započeli intenzivna istraživanja čiji je rezultat bio druga generacija ovih izolatora. Vojničkim rječnikom govoreći bilo je jasno da postoji agresor; trebalo je uspostaviti učinkovitu obranu koja će usprkos njegovim napadima osigurati integritet utvrde. Neprijateljski vojnici su ovdje nabijene čestice što čine tok klizne struje. Taj im je tok potrebno prekinuti, budući da onda neće biti sposobni pucati iz oružja koje je ovdje površinsko parcijalno pražnjenje i na koje je osjetljiva naša utvrda načinjena od slabih polimernih organskih materijala. Tako je, zahvaljujući jednom od polimerima inherentnih svojstava, postavljena prva crta obrane kompozitnih polimernih izolatora – hidrofobična površina koja je u stanju intenzitet klizne struje svesti na razinu koja neće dovoditi do površinskih parcijalnih pražnjenja. Kad napadi postanu toliko intenzivni da padne prva crta obrane, materijal površine izolatora i njegova konstrukcija moraju biti izdržljivi na utjecaje pucnjave – druga crta obrane – moraju biti otporni na stvaranje tragova, a erozija i kad do nje dođe ne smije ugroziti ni električki, ni mehanički integritet izolatora.



Slika 1. Gorurova karta starenja kompozitnih polimernih izolatora[1]

Druga generacija polimernih izolatora ponudila je materijale otporne na *tracking* i otpornije na utjecaje pražnjenja. Osim toga ostvarene su bolje veze s armaturama, te riješen problem mehaničkog dimenzioniranja jezgre. Poboljšana kontrola kakvoće utjecala je, sa svoje strane, na povećanje pouzdanosti nove generacije kompozitnih polimernih izolatora, tako da je od njih postalo sasvim realno očekivati životnu dob od 20 do 30 godina.

Zrelost spoznaje da obnova prve crte obrane nakon što dođe do njezinog pada – regeneracija izgubljene hidrofobičnosti – predstavlja ključnu činjenicu u obrani kompozitnih polimernih izolatora od napada što ih vrši sustav multidimenzionalnih naprezanja, dovela je, u vremenu što pripada posljednjem desetljeću dvadesetog stoljeća, do nastupa treće generacije polimernih izolatora: silikonska guma, zahvaljujući svojstvu regeneracije izgubljene hidrofobičnosti, postala je materijal kojega su prihvatili gotovo svi proizvođači u svijetu.

Zahvaljujući ranije navedenim prednostima u odnosu na konvencionalne izolatore, konzekventnom sniženju sveukupnih troškova, značajnim poboljšanjem u performansama i kakvoći proizvodnje što ga je u odnosu na prvu generaciju kompozitnih polimernih izolatora donio razvoj u ovoj tehnologiji, te činjenici da je značajno opala i njihova nabavna cijena, ovi izolatori su danas postali najbolji izbor kod gradnje novih i rekonstrukcije postojećih sustava prijenosa i distribucije električne energije. Da je tako najbolje govori podatak da su danas 60% – 70% svih izolatora koji se instaliraju u USA upravo kompozitni polimerni izolatori.

Za razliku od situacije što smo je imali u vrijeme prve generacije kompozitnih izolatora, danas možemo kazati da su proizvođači naučili bolje kontrolirati svoje procese proizvodnje. Oni su istodobno uspjeli poboljšati formulacije kako bi postigli bolje konačne karakteristike svojih proizvoda. Sve je to bilo moguće zahvaljujući boljem razumijevanju utjecaja okoliša na polimerne materijale, tako da današnji polimeri koriste poboljšane antidegradante kad su u pitanju utjecaji ultravioletnog zračenja, topline i kemijskih napada. Istodobno su učinjena i značajna poboljšanja kad je riječ o baznim kompaundima koji se koriste u proizvodnji konačnog materijala.

Svaki proizvođač koji se nije bavio istraživanjima, čiji su rezultat bili poboljšanje formulacije kompaunda, žrtvovao je poboljšana svojstva svojih proizvoda.

U okviru problema s kojima su se suočili u eksploataciji kompozitnih polimernih izolatora proizvođači i korisnici su stekli značajne spoznaje o njihovim uzročnicima. To je rezultiralo u poboljšanim programima ispitivanja i znatno boljem razumijevanju uzroka i rješenja osnovnog problema – problem starenja.

Današnja generacija kompozitnih izolatora nudi znatno poboljšana rješenja zaštite od oštećenja prouzročenih djelovanjem korone, tako što su u mnoge konstrukcije inkorporirani ekrani putem kojih se izolira ili eliminira utjecaj korone.

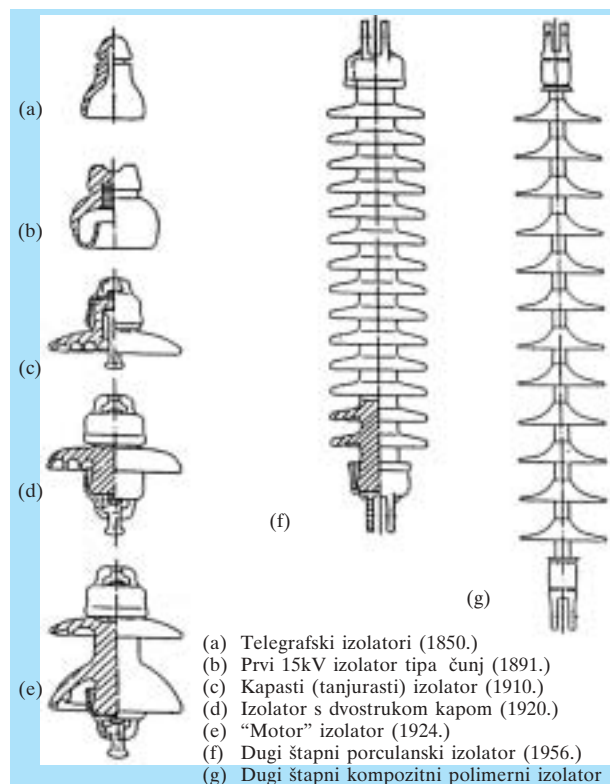
3. USPOREDBA KONVENCIONALNIH I KOMPOZITNIH POLIMERNIH IZOLATORA

3.1. Povijest razvoja izolatora za prijenosne vodove

Povijest razvoja visokonaponskih izolatora govori da su oni svoje ishodište imali u telegrafskim izolatorima koji su se koristili još do kraja posljednjeg desetljeća 19. stoljeća (sl. 2a.). Izolatori tipa čunj (*pin-type*) (sl. 2b.) primijenjeni su za prve 15 kV-ne prijenosne vodove 1891. godine. Kad su na red došli viši naponi, ekonomski razlozi su zahtijevali ovjesnu poziciju vodiča. Kako su tad raspoloživi materijali mogli podnijeti samo ograničena naprezanja na istezanje, razvijena je konstrukcija kapastog (tanjurastog) izolatora koji omogućuje da se naprezanje na vlak koje postoji na armaturama (kapa i tučak), konvertira u naprezanje na tlak i smicanje u izolacijskom tijelu (sl. 2c.). Prisutni nedostaci ovog načela konstrukcije:

- proboj tanjura prouzročen koincidencijom visokog električkog i mehaničkog naprezanja između kape i tučka;
- osrednja svojstva u uvjetima onečišćenja zbog prisustva neadekvatno dizajniranih donjih rebara;
- radiosmetnje zbog korona pražnjenja u blizini tučka;
- korozija tučka prouzročena istosmjernom komponentom klizne struje u uvjetima onečišćenja 3 ;
- pucanje kape zbog širenja cementa 4 .

Ipak, mnogi korisnici širom svijeta ne odustaju od primjene ove tehnologije i ove konstrukcije na svojim prijenosnim vodovima.



Slika 2. Razvoj visokonaponskih izolatora za prijenosne vodove [2]

Drugi su korisnici, međutim, iskoristili progres u razvoju izolacijskih materijala (mogućnost da se proizvede porculan s povećanom čvrstoćom na vlak) i na temelju toga razvijena je konstrukcija dugog štapnog izolatora, koji ne pati od svih prethodno pobrojanih nedostataka. Njegova posebnost sastoji se u tome što se opterećenje na vlak inducira u izolacijsko tijelo, pri čemu je izolator cijelom svojom duljinom opterećen na vlak. Slike 2d. i 2e. prikazuju prve izolatore s takvim dizajnom. Današnji moderni dugi štapni izolatori proizvode se od visokokvalitetnog aluminijskog porculana, čime se postižu duljine do 2 m i promjeri jezgre do 125 mm (sl. 2f.).

U nastojanju da se, koristeći prednosti dizajna dugog štapnog izolatora, osvoji prostor ekstra i ultra visokih napona i pri tome postignu tri osnovna cilja:

- sniženje sveukupne ovjesne mase izolacijske konstrukcije;
- mogućnost prijenosa velikih snaga;
- sniženje troškova održavanja,

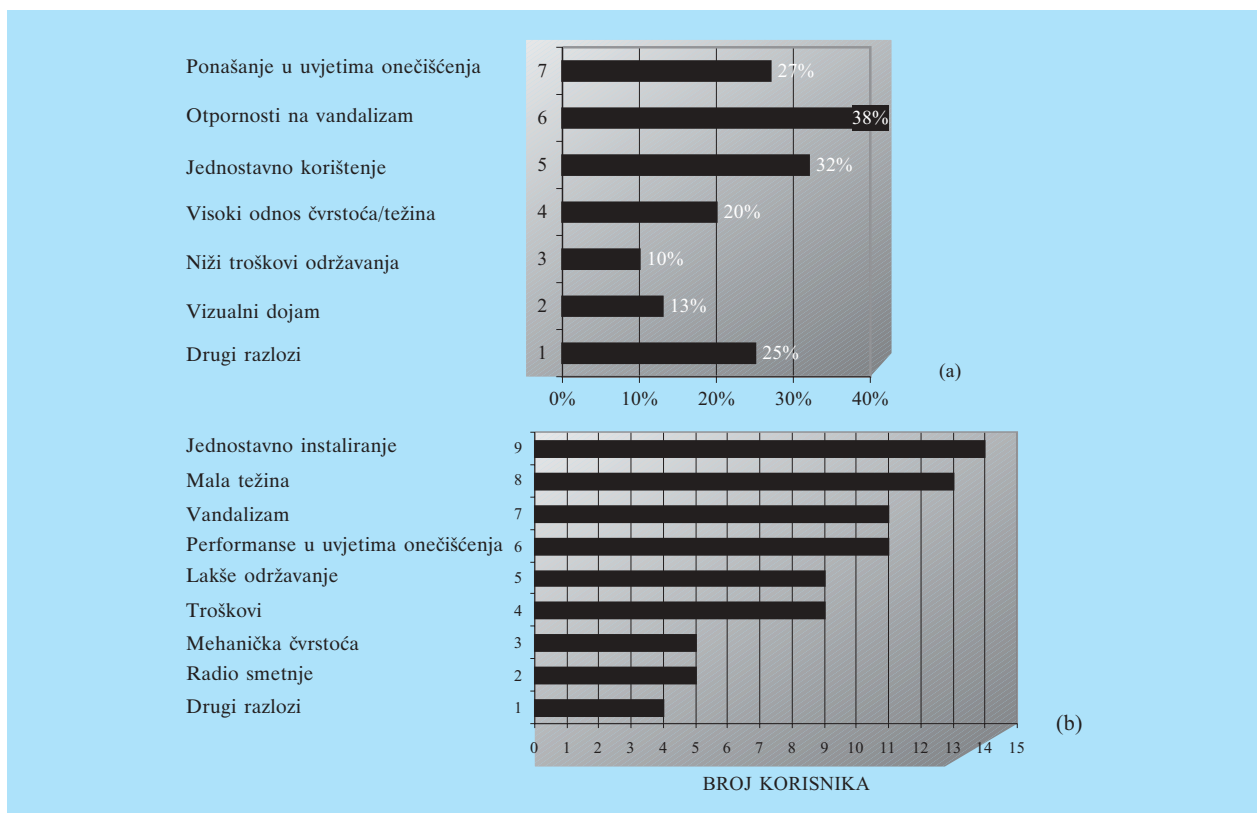
razvijena je konstrukcija kompozitnog polimernog izolatora – sl. 2g.

3.2. Opće prednosti kompozitnih polimernih izolatora

Međunarodni savjet za velike električne sustave (CIGRE) je prvi put 1990., 5 a potom ponovno 2000. 6, objavio rezultate anketa koje su se odnosile na razloge zbog

kojih su korisnici širom svijeta donijeli odluke da na svoje dalekovode ugrade kompozitne polimerne izolatore. Rezultati ovih anketa prikazani su na sl. 3.

Otpornost na vandalizam, posebice pušćanu vatru, predstavlja veoma važan faktor na tržištu u USA. Ponašanje u uvjetima onečišćene atmosfere, o čemu će kasnije biti više riječi, je, kao što se vidi, jedna od osnovnih prednosti. Jednostavno upravljanje odnosi se na sniženje rizika od oštećenja u transportu (lom rebara), kao i na jednostavnije montiranje na stup, bilo da se koristi ručna montaža (nisu potrebne skele i kolature) ili da se primjenjuju helikopteri. S tim u svezi je i smanjenje prostora potrebnog za skladištenje – izolatori se pakiraju u kartonske tube i s njima se jednostavnije manipulira u fazi transporta i skladištenja. Visoki omjer mehanička čvrstoća/težina je interesantan kod projektiranja novih prijenosnih vodova. U pitanju je niža razina zahtjeva u pogledu stupova i koridora, budući da povišenje ovog omjera omogućuje primjenu novih dizajna i koncepata izolacijskih konstrukcija i konstrukcija stupova, a što za posljedicu ima sniženje troškova izgradnje dalekovoda, odnosno mogućnost podizanja naponske razine postojećih vodova. Niži troškovi održavanja – nisu potrebni uobičajeni ciklusi čišćenja izolatora – posljedica su superiornog ponašanja kompozitnih polimernih izolatora u uvjetima onečišćene atmosfere. Vizualni dojam se popravlja zbog činjenice da su izbjegnute armature



Slika 3. Kriteriji zbog kojih su se korisnici odlučili primijeniti kompozitne polimerne izolatore:

(a) Rezultati ankete obavljene od strane CIGRE [5];

(b) Rezultati ankete što ju je objavio japanski Tehnički komitet za izolatore [7]

između pojedinačnih jedinica u izolatorskom lancu. Drugi razlozi odnose se na sigurnost od prijeloma u slučaju dinamičkih mehaničkih naprezanja, te na mogućnost kompaktiranja prijenosnih vodova.

Premda je tijekom devedesetih godina broj instaliranih kompozitnih izolatora u svijetu doživio veliki porast, ne postoje svježiji, na široj osnovi elaborirani podaci o razlozima za njihovo uvođenje niti o iskustvima u njihovoj primjeni.

Iz tog razloga zadovoljit ćemo se i pregledom što ga je nedavno publicirao japanski Tehnički komitet za kompozitne izolatore (*Non – Ceramic (composite) Insulators Technical Committee*) 7. Radi se o podacima prikupljenim od osamnaest korisnika kompozitnih polimernih izolatora: iz Sjeverne Amerike (10), Europe (6) i Australije (2).

Na sl. 3b. prikazani su rezultati ove ankete, s navedenim razlozima zbog kojih su se korisnici odlučili uvesti kompozitne polimerne izolatore.

3.3. Usporedba mehaničkih svojstava

Snižanje mase u odnosu na konvencionalni dizajn posljedica je sljedećih činitelja:

- odsustvo armatura između pojedinih jedinica, budući da se već danas mogu proizvesti jednodijelni dugi štapni izolatori čija je duljina približno 6 m, što odgovara naponskoj razini od 800 kV;
- promjena koncepta dizajna – manji promjer;
- niža specifična gustoća korištenih materijala.

U Tablici 2 prikazani su podaci koji slikovito govore o tome što u pogledu sniženja mase izolacijske konstrukcije donosi tehnologija kompozitnih polimernih izolatora.

Tablica 2. Usporedba masa porculanskih i kompozitnih polimernih izolatora [8]

Napon (kV)	Masa (kg)				
	Konvencionalni izolatori			Kompozitni izolatori	
	Broj jedinica	I-lanac	V-lanac	I-lanac	L-lanac
230	12	205	410	16	32
345	18	306	612	27	54
500	25	427	854	50	100

U Tablici 3, radi ilustracije ranijih navoda o povećanom odnosu mehanička čvrstoća/težina, prika-

Tablica 3. Usporedba mehaničkih svojstava materijala koji se koriste u proizvodnji izolatora [2]

Vrsta materijala		Čvrstoća na vlak (Mpa)	Čvrstoća na tlak (Mpa)	Čvrstoća na savijanje (Mpa)	E-modul (Mpa)
Porculan		30 – 60	450 – 550	35 – 90	55 000
Kompoziti	Smola ojačana staklenim vlaknima (na mokro)	62 – 230	95 – 180	125 – 210	14 000 – 27 000
	Smola ojačana staklenim vlaknima (u vakuumu)	400	320	530	28 000

zana je usporedba osnovnih mehaničkih svojstava materijala koji se koriste u proizvodnji visokonaponskih izolatora.

3.4. Usporedba električkih (izolacijskih) svojstava

Električka izolacija prijenosnih vodova i postrojenja instaliranih na otvorenom postiže se pomoću zraka što ih okružuje. Izolatori, čija se funkcija sastoji prije svega u tome da budu čvrsta i pouzdana mehanička potpora vodičima, održavaju prijeko potrebni preskočni razmak – ono kod kojega neće doći do preskoka u zraku.

Dakle, kad bi im površina bila uvijek suha i čista onda i ne bi morali imati relativno složenu formu (rebra, "suknjice" na donjoj površini, aerodinamički oblik rebara i sl.). Isto tako, s električke točke gledanja, ne bi bilo posebno važno iz kojeg su materijala izrađeni.

Budući da visokonaponski izolatori dalekovoda i postrojenja ne "žive" pod staklenim zvonom, nego su izloženi stalnim utjecajima atmosfere (onečišćenje, kiša, rosa, magla, UV-zračenje i sl.), njihova površina može postati manje ili više vodljivom. Iz tog razloga će napon kod kojeg dolazi do preskoka zračnog razmaka (preskočni napon) biti niži od onog koji se ima kod suhe površine. Visina ovog napona je u realnim uvjetima rada funkcija oblika izolatora (duljina klizne staze i faktor oblika) i specifične površinske vodljivosti elektrolitičkog sloja što se formira na njegovoj površini pod utjecajem nataloženog onečišćenja i padalina, ali i načina na koji dolazi do njezinog vlaženja, tj. materijala površine izolatora.

Električka svojstva (izolacijska čvrstoća) dane izolacijske površine, odnosno površine danog izolatora, definirana su, dakle, visinom preskočnog napona u uvjetima prisustva vodljivog (elektrolitičkog) sloja onečišćenja. Na temelju pokusa utvrđena je sljedeća analitička relacija koja opisuje tzv. karakteristiku onečišćenja 9 :

$$U_f = k_F \gamma_s^{-n} \quad (1)$$

gdje su: U_f – preskočni napon u uvjetima prisustva vodljivog sloja onečišćenja;

k_F – konstanta koja ovisi o geometriji izolatora;

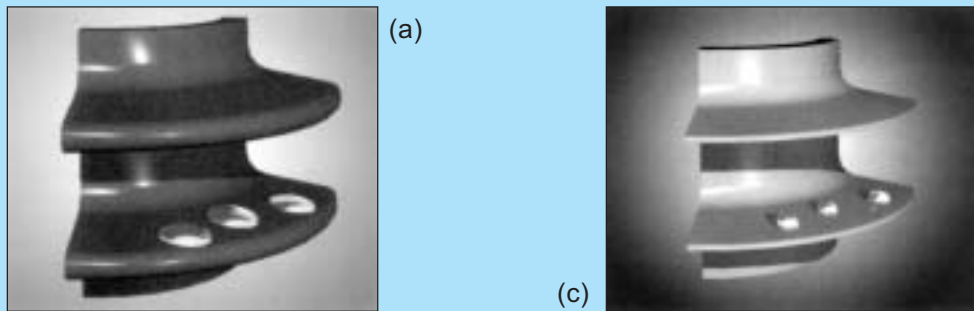
γ_s – specifična površinska vodljivost sloja onečišćenja; $\gamma_s = \gamma$

– specifična volumna vodljivost magle;

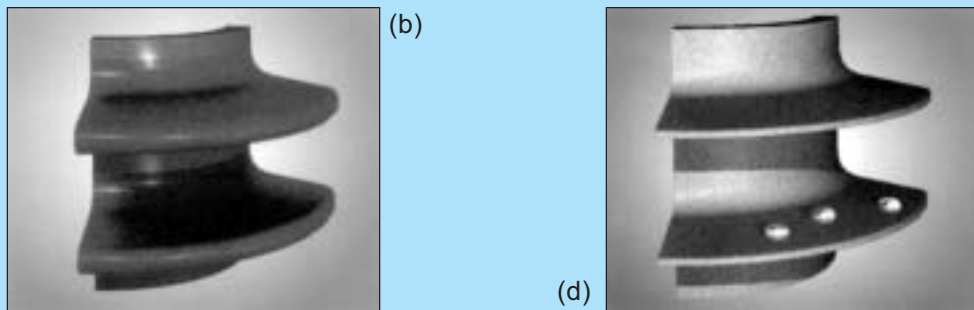
– debljina sloja onečišćenja;

n – koeficijent nagiba karakteristike onečišćenja.

Površine čistih izolatora: Stupanj vodoodbojnosti na hidrofobičnoj silikonskoj gumi (c) je mnogo viši od onog što ga ima hidrofilični porculan (a)



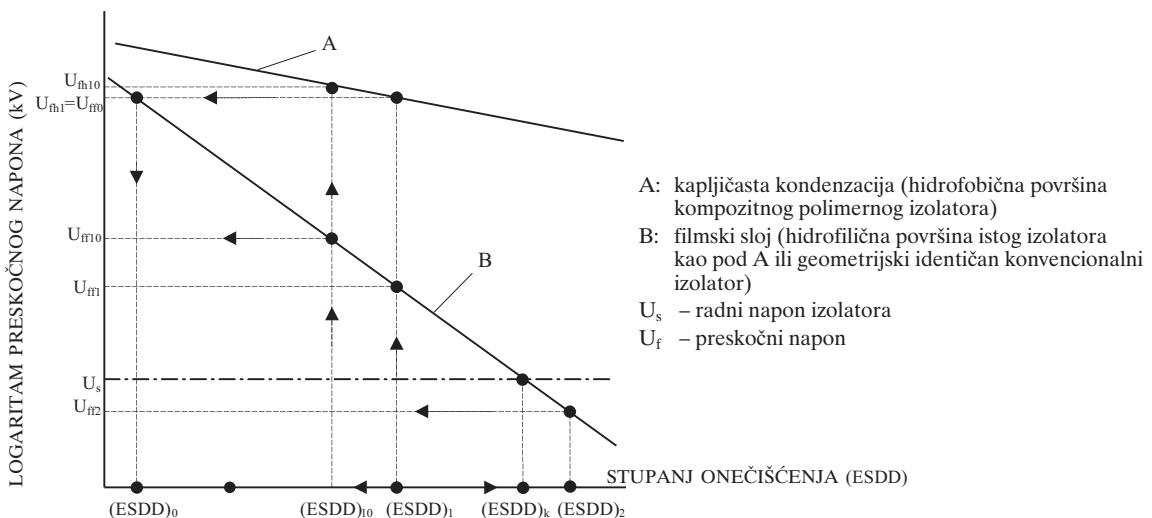
Površine izolatora prekrivenih slojem onečišćenja: Dok na površini porculana (b) voda potpuno prodire u hidrofilični sloj onečišćenja, površina silikonske gume (d), zahvaljujući transferu hidrofobičnosti, ima još uvijek visok stupanj vodoodbojnosti.



Slika 4. Prikaz ponašanja hidrofiličnih – (a), (b) i hidrofobičnih izolacijskih površina – (c) i (d) [2]

Za razliku od keramičkih materijala čija se površina jednoliko vlaži (visoka slobodna površinska energija porculana stupa u interakciju s kohezivnim površinskim naponom vode) – sl. 4a. i 4b., polimerni materijali, pod uvjetom da su čisti i još uvijek neoštećeni, imaju površinu koja je vodoodbojna (hidrofobična), tako da se na njoj ne formira kontinuiran vodeni film, nego diskretne vodene kapljice (sl. 4c).

Na sl. 5. dan je kvalitativni prikaz dviju preskočnih karakteristika: karakteristika označena sa (A) odnosi se na jedan kompozitni polimerni izolator na čijoj površini, zahvaljujući svojstvu transfera hidrofobičnosti, i u uvjetima onečišćenja, voda formira odvojene kapljice kao kod čistog i neoštećenog izolatora – sl. 4d., dok karakteristika (B) odgovara istom tom izolatoru koji je, zbog različitih uzroka, privremeno ili



Slika 5. Preskočne karakteristike izolatora kod različitih uvjeta što vladaju na njegovoj površini

trajno izgubio to svojstvo. Prema tome, karakteristika (B) odgovarala bi geometrijski identičnom konvencionalnom izolatoru.

Kod danog stupnja onečišćenja (ESDD)₁* hidrofobičnoj površini odgovarat će preskočni napon U_{f1} , koji je znatno viši od radnog napona U_s . U slučaju da dođe do gubitka hidrofobičnosti, površine kompozitnog izolatora, kao i u slučaju kad je umjesto danog kompozitnog polimernog izolatora upotrijebljen konvencionalni izolator (prijelaz s karakteristike (A) na karakteristiku (B)), za održavanje nepromijenjene pogonske sigurnosti izolatora, odnosno sustava u kojemu je taj izolator instaliran, potrebno je sniziti površinsku provodnost sloja onečišćenja na vrijednost (ESDD)_o, što praktički znači poduzeti palijativne mjere pranja ili čišćenja. U protivnom bi svako povećanje vodljivosti iznad (ESDD)_k dovelo do preskoka na radnom naponu (na primjer (ESDD)₂ – U_{f2} – U_s). Ukoliko, međutim, zbog prestanka vlaženja, odnosno sušenja površine izolatora, dođe do sniženja vodljivosti, na primjer sa (ESDD)₁ na (ESDD)₁₀, preskok će biti izbjegnuto (U_{f10} – U_s). Ako sušenje površine izolatora dovede do odvijanja procesa obnove hidrofobičnosti (prijelaz s karakteristike (B) na karakteristiku (A)), to će omogućiti još pouzdaniji rad (U_{f10} – U_s), promatranog izolatora u uvjetima onečišćene atmosfere bez da se poduzimaju palijativne mjere pranja i čišćenja, budući da će proces obnove hidrofobičnosti omogućiti "zacjeljivanje rana" što ih je izazvala površinska erozija primjerice.

3.5. Usporedba ponašanja u pogonskim uvjetima

Radi usporedbe ponašanja osnovnih vrsta kompozitnih polimernih izolatora (EP guma i silikonska guma), kao i usporedbe njihovog ponašanja u odnosu na ponašanje konvencionalnih izolatora, prikazat ćemo neke od interesantnih rezultata do kojih su došli istraživači širom svijeta.

Prvu usporedbu dali su Cherny i Stoukus iz tvrtke *Ontario Hydro* 1979. godine. 10 Oni su ustanovili da se na izolatorima od EP gume već nakon 18 mjeseci starenja u realnim uvjetima (vod 550 kV) događaju takva oštećenja površine koja snizuju njihovu izolacijsku čvrstoću za 25 – 30%, dok izolatori od silikonske gume ne pokazuju nikakva oštećenja niti im se snizuje izolacijska čvrstoća. Autori iz Švedske 11 saopćili su rezultate do kojih su došli nakon što su od 5 do 9 godina pratili ponašanje izolatora u pogonu. Ustanovljeno je da su nakon prve dvije godine rada kompozitni izolatori održali veoma dobre karakteristike – usporedive s karakteristikama konvencionalnih izolatora. Međutim, u kasnijim godinama, za razliku od izolatora od silikonske gume, koji su i dalje imali superiorne karakteristike, izolatori od EP gume pokazali su značajno sniženje izolacijske čvrstoće. Naime, svi (konvencionalni i EP izolatori), izuzev izolatora od silikon-

ske gume, su nakon što su bili prekriveni značajnim količinama morske soli doživjeli preskoke. Na silikonskim izolatorima nije čak opažena niti aktivnost pražnjenja; ustanovljeno je samo neznatno povećanje klizne struje uz njezine slabe varijacije.

Isti istraživači 12 također su otkrili da je do slabljenja izolacijskih svojstava EP gume došlo zbog njezina starenja, dok je za silikonsku gumu ustvrđeno da se na površini formira niskomolekularni silikonski sloj koji posjedujući izvanredna hidrofobična svojstva održava izolacijske karakteristike izolatora u uvjetima starenja. Starenje EP gume praćeno je nereverzibilnim razaranjem površine, a kod pojedinih konstrukcija događale su se pukotine na sučeljima i razaranja rebara 13 .

Od 1980. do 1985. u Njemačkoj su ispitivani kompozitni izolatori različitih proizvođača na 225 kV ispitnoj stanici lociranoj uz morsku obalu 14 . Premda se tijekom ispitivanja nije dogodio niti jedan preskok, uočene su značajne razlike u ponašanju izolatora s različitim materijalima kućišta. Ustanovljeno je da silikonski izolatori nakon 5 godina nisu imali impulse klizne struje veće od 10 mA, dok su izolatori od EP gume imali veliki broj ovakvih impulsa, te već nakon dvije godine, doživjeli proboje rebara, odnosno rascjepa na sučelju i tragove erozije poslije 5 godina. Zahvaljujući svim ovim saznanjima narastao je interes za korištenjem kompozitnih izolatora s kućištem izrađenim iz silikonske gume 14 . Osim toga, postalo je evidentno da silikonska guma ima bolje karakteristike u odnosu na porculan i staklo. To je pokazano ne samo kroz stečena pogonska iskustva 14, 15, 16 , nego i kroz rezultate dobivene u laboratorijima i ispitnim stanicama na otvorenom 16, 17, 18 .

Nakon četrnaestogodišnjeg rada na *Hydro Quebecovim* 735 kV vodovima, kompozitni polimerni izolatori s kućištem od silikonske gume nisu pokazali nikakva vidljiva oštećenja, iako su radili u uvjetima dosta intenzivnog onečišćenja 19 . Zbog ovih izvanrednih svojstava u uvjetima s onečišćenom atmosferom, kompozitni polimerni izolatori s kućištem od silikonske gume danas se kod ovog korisnika široko koriste kao zamjena za konvencionalne izolatore, na kojima dolazi do pojave preskoka ili drugih defekata.

Izraelska elektroprivreda je 1993. 21 , prikupivši podatke od šesnaest korisnika iz Južne Afrike, Kanade, Australije, Namibije, Španjolske, Švicarske i USA, a koji se odnose na 60 000 kompozitnih izolatora (uglavnom onih koji imaju kućište od silikonske gume), došla do sljedećih zaključaka:

- osnovni razlozi za korištenje kompozitnih izolatora su sniženi troškovi održavanja i poboljšane karakteristike glede otpornosti na vandalizam;
- mnogi od korisnika su promijenili svoje specifikacije odlučujući se isključivo na izolatore s kućištem od silikonske gume;
- većina izolatora s kućištem od silikonske gume radi bez čišćenja – čak i u uvjetima jako onečišćene at-

* Na apscisu karakteristike onečišćenja mogu se nanijeti vrijednosti ekvivalentne gustoće soli – ESDD

mosfere – ponašajući se i u takvim uvjetima superiornije od konvencionalnih izolatora i izolatora na bazi EPDM;

- kad su u pitanju kvarovi mehaničke naravi, svi oni odnosili su se na krhki prijelom jedinica koje su imale jezgru temeljenu na standardnom E-staklu.

Elektroprivredna tvrtka Južne Afrike ESKOM je, radi zamjene konvencionalnih izolatora, koji su se pokazali slabim zbog problema vandalizma i preskoka u uvjetima onečišćene atmosfere 22, još od 1978. počela s instaliranjem izolatora na bazi silikonske gume, sve do naponskog nivoa 400 kV. Na ukupno 25 426 km vodova 275 kV i 400 kV, 10% ugrađenih izolatora danas su kompozitni polimerni izolatori uz stalnu tendenciju da se ovaj udio povećava. Primjenom izolatora od silikonske gume, koji se ponašaju bolje od izolatora na bazi EPDM i konvencionalnih izolatora 23, izbjegli su troškove veoma skupog pranja izolatora pomoću helikoptera u priobalnim područjima. Osim toga, na ovaj su način poboljšane karakteristike vodova budući da je smanjen broj ispada. ESKOM smatra da su kompozitni izolatori na bazi silikonske gume uvjerljiva alternativa za konvencionalne izolatore.

Španjolska elektroprivredna tvrtka REE izvješćuje da je broj kvarova koji se odnose na uvjete onečišćene atmosfere drastično snižen nakon što su konvencionalni stakleni izolatori zamijenjeni kompozitnim polimernim izolatorima s kućištem od silikonske gume 24.

Jedna od američkih elektroprivreda, *Florida Power and Light* (FPL), također saopćava svoja dobra iskustva s izolatorima na bazi silikonske gume 25. Prema njihovim iskustvima, karakteristike ovih izolatora u uvjetima onečišćene atmosfere bolje su nego bilo kojih drugih izolatora, čak i u slučajevima kad se reducira ili uopće ne primjenjuje pranje izolatora. Iskustva do kojih je FPL došla tijekom snažnih slanih oluja (1991. i 1996.) 26 ukazuju na činjenicu da su preskoci do kojih je tom prilikom došlo (217 ispada i preskoci na 72 izolatora, od čega 48 na kompozitnim polimernim izolatorima od EP gume, u oluji koja se dogodila 1996.) posljedica loših svojstava materijala kućišta. To potvrđuje podatak da se, u danim okolnostima, na izolatorima na bazi silikonske gume, s istom duljinom klizne staze nije dogodio niti jedan preskok.

Rezultati do kojih su došli istraživači iz Švedske, koji se odnose na desetogodišnje istraživanje ponašanja kompozitnih izolatora u ispitnoj stanici Sveučilišta *Chalmers Anneberg* – testirano je šest izolatora s kućištem silikonske gume i tri izolatora od EPDM gume – ponovno pokazuju da postoji čvrsta povezanost između uvjeta na površini izolatora, posebice svojstva hidrofobičnosti i performansi izolatora (klizna struja, izolacijska čvrstoća). Ustanovljena je ozbiljna površinska degradacija izolatora s kućištem od EPDM gume s ATH kao punilom. Kod izolatora, na bazi silikonske gume, međutim, radilo se samo o niskom stupnju degradacije. Klizne struje na četiri od šest izolatora ove

vrste nisu nikad prešle 15 mA, dok su na druga dva tijekom oluja registrirane vršne vrijednosti od 60 i 90 mA. Na izolatorima iz EPDM gume izmjerene su vršne vrijednosti od 135 odnosno 210 mA, kojom prilikom je jedan od njih doživio preskok. Ranija istraživanja u istoj ispitnoj stanici 27 pokazala su da izolatori od EP gume mogu doživjeti slabljenje izolacijskih svojstava, zbog različitih uzroka, ovisno o kompoziciji materijala, konstrukciji i procesu proizvodnje. To se naravno može dogoditi i s izolatorima od silikonske gume, tako da generičko ime materijala kućišta ne znači automatski dobre, odnosno loše karakteristike. Tako na primjer J. T. Looms 28 navodi rezultate istraživanja prema kojima jedna vrsta silikonske gume ima prognozu životne dobi od 25 godina, a druga svega 2,6 godina. Jasno je, prema tome, da samo adekvatno testiranje funkcionalnosti i konačno stečena pogonska iskustva mogu biti garancija razine svojstava kompozitnih polimernih izolatora.

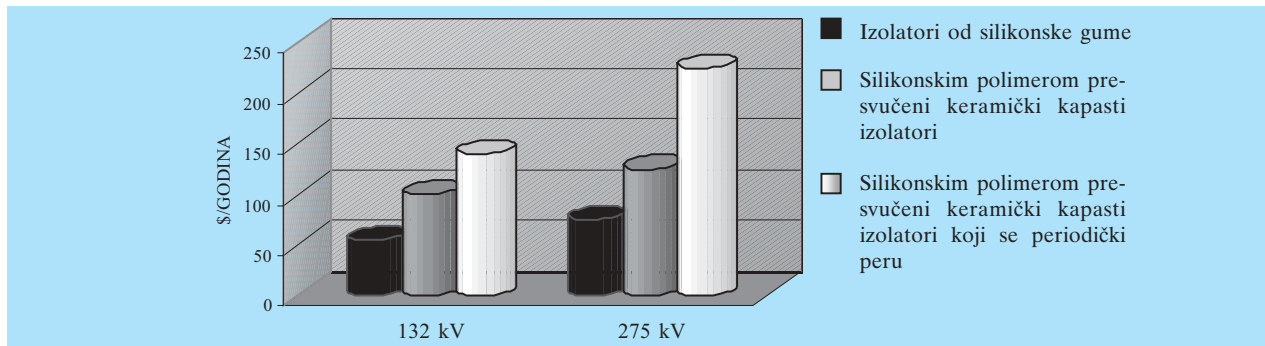
3.6. Ekonomska usporedba

Ekonomska opravdanost primjene kompozitnih polimernih izolatora u početku se uglavnom ogledala u sniženju troškova održavanja. Tu je također i sniženje troškova vezanih za broj prekida u napajanju kao i skraćivanje vremena potrebnog za zamjenu jedinica oštećenih prilikom tih prekida. Kad su u pitanju izolatori čija površina održava svojstvo hidrofobičnosti tijekom čitavog životnog vijeka izolatora, onda ovom treba pridodati uštede što proizlaze iz sniženja gubitaka energije – protjecanje manje klizne struje.

Što se tiče inicijalnih troškova (troškovi nabave) kompozitnih polimernih izolatora, možemo kazati da se danas na tržištu mogu naći kompozitni polimerni izolatori čija je cijena niža, ali i oni čija je cijena znatno niža od cijene konvencionalnih izolatora. Ovdje se krije stupica u koju mogu upasti korisnici. Stečena iskustva iz eksploatacije, naime, govore da su se s izolatorima koji nisu prošli postojeće IEC standarde već nakon nekoliko godina eksploatacije pojavili ozbiljni problemi 29: jeftin kompozitni polimerni izolator može značiti loše električke i mehaničke karakteristike.

Imajući u vidu činjenicu da troškovi nabave izolatora mogu dostići maksimalno pet postotaka troškova izgradnje dalekovoda, lako zaključujemo da kupovinom jeftinih izolatora, tj. onih čija je cijena niža 20–40%, možemo uštedjeti svega jedan do dva postotka ukupnih troškova. Na korisniku je onda da se zapita vrijedi li to rizika glede sniženja karakteristika voda zbog povećane vjerojatnosti preskoka i povećanih troškova održavanja.

Da bi se izvršila analiza ekonomske opravdanosti uvođenja kompozitnih izolatora potrebno je uzeti u obzir troškove nabave kao i ostale troškove: skladištenje, transport, instaliranje i održavanje. Na sl. 6. prikazani su usporedno ukupni godišnji troškovi triju varijanti: izolatori na bazi silikonske gume, silikonskim



Slika 6. Usporedba godišnjih troškova triju različitih varijanata [30]

polimerom prekriveni keramički izolatori, keramički izolatori koji se periodično peru. Riječ je o analizi što ju je napravila australska elektroprivredna kompanija *Powerlink Queensland* 30 .

Kao što se vidi, ukupni godišnji troškovi primjene kompozitnih polimernih izolatora od silikonske gume iznose 30 – 40% troškova primjene konvencionalnih izolatora.

Na temelju analize izraelske elektroprivrede 31 – *Israel Electric Corp. Ltd* – proizlazi da ukupni godišnji troškovi primjene izolatora od silikonske gume koji ne zahtijevaju pranje iznosi svega 50% ukupnih troškova primjene konvencionalnih izolatora (pranje jedanput godišnje), odnosno 41% ovih troškova u slučaju da se i silikonski izolatori peru svakih pet godina. Pri tom je kalkulirano s kompozitnim izolatorima čija je nabavna cijena 70% viša od cijene konvencionalnih izolatora.

The Los Angeles Department of Water and Power je bio jedan od prvih korisnika u USA koji je nakon skoro potpunog prijelaza na kompozitne polimerne izolatore na naponima 115, 138 i 230 kV, donio odluku da na novim dalekovodima 500 kV isključivo koristi ove izolatore 32 . Jedan od osnovnih razloga za ovakvu odluku leži u eliminiranju troškova pranja izolatora.

Florida Power & Light Company, koja kompozitne polimerne izolatore koristi na svojim prijenosnim vodovima još od 1977., donijela je nedavno odluku da ih primijeni i na jednom novom 500 kV vodu 33 . Prije donošenja ovakve odluke, bez obzira na činjenicu da je cijena ponude izabranih kompozitnih polimernih izolatora bila za 45% niža od cijene ekvivalentnih porculanskih izolatora, te da je procijenjeno kako bi troškovi njihovog instaliranja bili za 73% niži od onih što ih zahtijeva instaliranje porculanskih izolatora, postavio se problem ekonomske opravdanosti s obzirom na aspekt životne dobi kompozitnih polimernih izolatora. Novi vod, naime, prolazi kroz područje koje karakteriziraju činitelji koji pridonose starenju kompozitnih polimernih izolatora: UV-zračenje, visoki stupanj vlažnosti, visoke temperature i onečišćenje. S obzirom na veliki stupanj rizika kad se radi o procjeni životne dobi kompozitnih polimernih izolatora, problem donošenja odluke postavljen je tako što je prvo izvršena procjena životne dobi porculanskih izolatora

u ovakvim uvjetima. Zatim su izračunati ukupni troškovi njihovog životnog ciklusa (osim troškova nabave i instalacije, troškovi radne snage i materijala prilikom održavanja, uključeni su i financijski činitelji: stopa eskalacije cijene materijala i cijene radne snage, diskautna stopa...). Izračunato je vrijeme u kojemu bi nakon ugradnje kompozitnih polimernih izolatora imali troškove jednake onim što bi ih porculanski izolatori imali tijekom procijenjenog životnog vijeka (32 godine). Rezultat je dao iznos 32/15, što znači da bi životna dob kompozitnih polimernih izolatora od svega 15 godina bila dovoljna da se isplati njihova ugradnja. S obzirom da iskustva što ih ima sama kompanija u eksploataciji kompozitnih polimernih izolatora slabije kakvoće (prva generacija) i procjene što ih daju testovi ubrzanog starenja glede modernih materijala i dizajna ovih izolatora govore da kompozitni polimerni izolatori mogu u ovom ambijentu raditi barem toliko dugo koliko i porculanski izolatori, nije bilo teško donijeti odluku o primjeni kompozitnih polimernih izolatora na novom 500 kV vodu.

4. ZAKLJUČAK

Iako je prošlo više od trideset godina otkako su stidljivo uvedeni u arenu visokog napona, i danas, kad govorimo o kompozitnim polimernim izolatorima, možemo kazati da je riječ o novoj tehnologiji. Bez obzira na to što su u međuvremenu postignuta značajna poboljšanja glede konstrukcija korištenih materijala i procesa proizvodnje, korisnici se u eksploataciji s vremena na vrijeme još uvijek sreću s izvjesnim problemima.

Kroz profesionalne susrete, što su na internacionalnom nivou sve češći, iskristalizirana su sljedeća, još uvijek otvorena, pitanja vezana za primjenu kompozitnih polimernih izolatora u elektroenergetskom sustavu.

- (i) Utvrđivanje ekvivalencije u odnosu na konvencionalne izolatore

Kad se radi o donošenju odluke o zamjeni postojećih konvencionalnih izolatora s kompozitnim polimernim izolatorima, razlike u konstrukciji i materijalima ot-

varaju niz veoma bitnih pitanja o kojima trebaju voditi računa i korisnici i proizvođači.

Osnovnu poteškoću kod primjene kompozitnih polimernih izolatora predstavlja činjenica da se, zbog zahtjeva za dugim metalnim armaturama potrebnim za stezanje fiberglasne jezgre, u odnosu na konvencionalne izolatore, snižava omjer osnovne impulsne izolacijske razine (BIL) prema spojnoj duljini. To praktički znači da se kod zadržavanja iste spojne duljine snižava iznos lučnog razmaka, tj. iznos kritičnog impulsnog napona.

Ove razlike veoma su bitne kad se radi o situacijama u kojima je prijeko potrebno održati postojeće razmake (zamjena uz zadržavanje postojećih stupova), dok kod primjene na novim stupovima obično ne predstavljaju problem. One se, međutim, mogu minimizirati, tako što će se umjesto zdjelice na vrhu kompozitnog polimernog izolatora upotrijebiti drugi tip armature – vilice na primjer: postojeća ovjesna oprema na stupu može se demontirati i spojna duljina kompozitnog polimernog izolatora će zapravo biti povećana za duljinu demontirane spojne opreme. Drugi način za otklanjanje ove razlike može biti primjena neke od inovacija koje se odnose na konstrukciju u kojoj su samo očke izrađene od metala, odnosno na one u kojima su metalne armature prekrivene polimernim materijalom. 2

Kad se radi o ekvivalentiranju glede karakteristika u uvjetima onečišćenja, onda, na temelju do sada iznesenog, možemo kazati da je zbog toga što u ovom pogledu postoje značajne razlike već između kompozitnih polimernih izolatora s različitim vrstama polimera, oblika rebara i pretpovijesti starenja, a pogotovu i između njih i konvencionalnih izolatora, veoma teško govoriti o rangiranju izolatora ili utvrđivanju ekvivalencije s konvencionalnim izolatorima.

Kad su u pitanju potporni izolatori, radi se o mnogo većoj mehaničkoj čvrstoći na udar nego kod konvencionalnih potpornih izolatora iste statičke čvrstoće. Isto tako, ako je riječ o izolatorima s kućištem od silikonske gume, kompozitni potporni izolatori imaju bolje karakteristike u uvjetima onečišćenja. Prema tome, nesumnjive su njihove prednosti na lokacijama izloženim seizmičkim djelovanjima i djelovanjima jakog onečišćenja. Problem je, međutim, u činjenici da potporni izolatori s čvrstom jezgrom mogu doživjeti velike defleksije (230 kV potporni izolatori se u rasponu od stanja bez opterećenja do maksimalno dopuštenog opterećenja mogu saviti i do 60 cm). Ovolike defleksije mogu dovesti do problema čije rješavanje traži primjenu skupljih izolatora sa šupljom jezgrom.

(ii) Promjene u kakvoći proizvoda i problem kontrole kakvoće

U situaciji koja postoji danas u oblasti elektroenergetike, gdje korisnici elektroopreme pripremaju se za deregulaciju reduciraju investicije i sredstva za održavanje, sve je manje raspoloživih novaca za izolatore. To je razlogom da se strategija proizvođača usmjerava ka promoviranju prednosti što ih donose

kompozitni polimerni izolatori u odnosu na konvencionalne, sniženju cijena proizvoda i poboljšanju njihovih karakteristika.

Svjedoci smo također osnivanja malih tvornica za proizvodnju kompozitnih polimernih izolatora u kojima je uposleno svega nekoliko inženjera, tako da se osnovni poslovi vezani za projektiranje i ispitivanje ugovaraju s vanjskim izvršiteljima. Mnoge stvari se mijenjaju tako brzo da korisnici to nisu kadri ni zapaziti, što, naravno, predstavlja značajan problem. Riječ je o promjenama koje se tiču: sastava gume, smole i stakla za izradu jezgre, zaptivke i metalnih armatura, debljine rebara i omotača što prekriva jezgru, oblika i razmaka između rebara, kao i opreme za proizvodnju. S obzirom na činjenicu da se toliko mnogo stvari mijenja veoma brzo, postavlja se pitanje mogu li se, u situaciji kad mnogi proizvođači nisu adekvatno ekipirani, na tržištu pojaviti proizvodi koji nisu prošli odgovarajuću kontrolu kakvoće konstrukcije i procesa proizvodnje. Potrebno je imati na umu činjenicu da u proizvodnji izolatora postoje veoma kritični koraci koji ne dopuštaju bilo kakve improvizacije u procesu.

Mnogi su korisnici već bili pokusni kunići, a njihova postrojenja i dalekovodi ispitne stanice nekih proizvođača. Zbog toga je prijeko potrebno da se korisnici ne zaokupljaju samo s problemima primjene i karakteristika kompozitnih polimernih izolatora, nego da otvore oči kad su u pitanju bilo kakve promjene što ih uvode proizvođači.

(iii) Održavanje pod naponom

Kao što smo već naveli ranije, iz razloga što postoji mala vjerojatnost da proces proizvodnje i kontrola kakvoće omoguće tako grube pogreške koje bi dovele do velikih oštećenja u samom proizvodu, kao i zbog toga što bi proizvodnja velikih jedinica zahtijevala napone koje je veoma teško imati u tvorničkom krugu, kompozitni polimerni izolatori ne podvrgavaju se niti jednom električkom testu prilikom njihove proizvodnje. Činjenica da su se zbog unutrašnjih oštećenja, istina na malom broju izolatora u svijetu, dogodili preskoci odmah nakon njihovog instaliranja, kod mnogih koji obavljaju održavanje pod naponom stvara se zabrinutost. To je razlog zbog kojeg neki korisnici postavljaju zahtjeve za električkim ispitivanjem kompozitnih polimernih izolatora prije njihovog instaliranja u mrežu koja se nalazi pod naponom. Problem je, međutim, u činjenici da ne postoji standardizirana metoda za provođenje ovog ispitivanja.

(iv) Starenje i dugovječnost

Polimerni materijali nisu inertni kao porculan i staklo, nego stupaju u interakciju s okolinom, što dovodi do promjena u njihovim svojstvima tijekom vremena. Ove permanentne promjene, kao što smo već kazali, stavljamo pod jedan zajednički nazivnik – *starenje*. Starenje je obično povezano s deterioracijom (nereverzibilne promjene) karakteristika.

S konceptom starenja, povezan je niz drugih problema koji još uvijek nisu dobro definirani, pa onda, naravno, nisu ni riješeni:

- Što znači "dugovječnost" a što "kraj životne dobi" kod kompozitnih polimernih izolatora?
- Kako se oni mogu predodrediti i kvantificirati?
- Kako se različiti materijali u pogledu starenja ponašaju u različitim aplikacijama i sredinama?

S obzirom da proizvođači stalno mijenjaju materijale i konstrukcije, jasno je da se mehanizam starenja, dugovječnost i kraj životne dobi, također mijenjaju, tako da, na primjer, karakteristika starenja koja se odnosi na neku od starih konstrukcija ne može biti relevantna glede novih vrsta konstrukcija.

(v) Zaštitni prstenovi

Još uvijek ne postoje standardi koji reguliraju ovo veoma važno pitanje: ukoliko ovi prstenovi ne štite izolator, pojaviti će se prijevremeni otkaz. Danas još uvijek svaki proizvođač daje svoje preporuke za primjenu svojih jedinstvenih zaštitnih prstenova. To otvara mogućnosti za instaliranje pogrješnih prstenova na danom izolatoru. Česti su slučajevi gdje je nepravilno instaliranje ili nepravilno rukovanje bilo uzročnikom ozbiljnih kvarova (krhki prijelom jezgre) na kompozitnim polimernim izolatorima. Ima i takvih situacija gdje proizvođač radi sniženja cijene isporučuje prstenove manjeg promjera, a da korisnici o tome ne samo da nisu dobili nikakvo tehničko objašnjenje nego čak nisu bili ni informirani.

(vi) Krhki prijelom

U jednoj anketi što ju je 1997. proveo *Edison Electric Institute* [1 dvadeset jedan od pedeset devet anketiranih korisnika (36%) izvijestio je o tome da su tijekom eksploatacije ovjesnih kompozitnih polimernih izolatora iskusili barem jedan krhki prijelom. Radi se o kvarovima na svim prijenosnim naponima i o kompozitnim polimernim izolatorima s i bez zaštitnih prstenova.

Krhki prijelom je kvar što ga je teško adresirati, budući da se uzročnik ove pojave može nalaziti u procesu proizvodnje, transportu i instaliranju, kao i u djelovanju različitih činitelja tijekom eksploatacije. Još uvijek ne postoji nikakav alat ili metoda za otkrivanje začetka ili trajanja ove vrste kvara.

Radne grupe IEEE i CIGRÉ, kao i različite istraživačke organizacije, uporno rade na problemu krhkog prijeloma, međutim, nepostojanje informacija i preporuka u ovoj oblasti još uvijek obeshrabruje mnoge korisnike da prihvate primjenu tehnologije kompozitnih polimernih izolatora.

LITERATURA

- 1 R. S. GORUR, E. A. CHERNEY, J. T. BURNHAM: "Outdoor Insulators", Ravi S. Gorur, Inc., 1999, (book).

- 2 K. SOKOLIJA: "Visokonaponski izolatori", Univerzitet u Sarajevu, ETF u Sarajevu, 2000. (knjiga).
- 3 D. A. SWIFT et al.: "The DC Component of Leakage Current on AC Energized Out-door Insulation: the Effect of Dry Band Discharges", 5th ISH Braunschweig, 1987. Paper 51.14.
- 4 E. A. CHERNEY, R. D. HOOTON: "Cement Grows Failure Mechanism in Porcelain Suspension Insulators", IEEE, Vol. PWRD-2, No. 1., Jan. 1987.
- 5 CIGRE WF. 22.03: "Worldwide Service Experience with HV Composite Insulators", *Electra*, Vol. 130, May 1990.
- 6 Working Group 03 of Study Committee 22, "Worldwide Service Experience with HV Composite Insulators", *Electra*, No 191, 2000.
- 7 T. KIKUCHI, S. NISHIMURA, M. NAGAO, K. IZUMI, Y. KUBOTA, M. SOKATA: "Survey on the Use of Non-ceramic Composite Insulators", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999.
- 8 CEVOSIL Composite Insulator A Superior Alternative to Porcelain, Fast Book Cevosil, AV-102 768-A, 08/1995.
- 9 K. SOKOLIJA: "Dinamički model preskoka izolacije u uvjetima zagađene atmosfere", Doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1988.
- 10 E. A. CHERNEY, D. I. STONKUS: "Nonceramic Insulators for Contaminated Environments", IEEE/PES 1979. Paper F 80 181–8.
- 11 E. M. SHERIF, A. E. VLASTOS: "Performance of Longrod Composite Insulators Under Various Contaminated Conditions", HVDC Insulator Symposium Univ. of S. California, Nov. 1985.
- 12 E. M. SHERIF, A. E. VLASTOS: "Influence of Aging on the Electrical Properties of Composite Insulators", 5th ISH Braunschweig, 1987, Paper 51.01.
- 13 A. E. VLASTOS: "Diagnosis of the Shed Surface Degradation on Composite Polymeric Insulators Long-Term Exposed to Outdoor Environment", CIGRE 1990. Session, Paper 15/33–05.
- 14 H. DIETZ et al.: "Latest Development and Experience with Composite Longrod Insulators", CIGRE 1986, Session, Paper 15–09.
- 15 E. A. CHERNEY: "State-of-the-Art Review on Composite Insulators Above 69 kV", CEA, Paper ST 118, April 1982.
- 16 R. S. GORUR et al.: "The Electrical performance of Polymeric Insulating Materials Under Accelerating Aging in Fog Chamber", IEEE Trans. on Power Delivery, 1988.
- 17 A. E. VLASTOS, E. M. SHERIF: "Experience form Insulators with RTV Silicone Rubber Sheds and Shed Coatings", IEEE/PES Winter Meeting, New York Jan. 1989, Paper VM 120–7 PWDR.
- 18 R. G. HOULTAGE, D. A. SWIFT: "Composite Rod Insulators for AC Power Lines: Electrical Performance of Various designs at a Coastal Station", IEEE Trans. on Power Delivery, paper No. 90WM 026–5 PWRD, 1990.
- 19 C. de TOURREIL: Discussion contribution to¹⁹.

- 20 R. S. GORUR et al.: "Aging in Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 7, No. 2, Apr. 1992.
- 21 R. MUNTEANU: "Silicone Rubber Insulators on ESKOM'S AC Transmission Lines", AC and DC Power Transmission, Conf. Publ. No. 423, IEEE 1996.
- 22 C. N. RAVERA et al.: "Silicone Rubber Insulators on ESKOM'S AC Transmission Lines", AC and DC Power Transmission, Conf. Publ. No. 423, IEEE 1996.
- 23 W. L. WOSLOO, F. F. BOLOGNA: "High Voltage Insulators: The Backbone of Transmission and Distribution Networks", World Congress on Insulator Technologies for the Year 2000 and Beyond, Barcelona, 1999.
- 24 J. J. MUNOZ: "Spanish Utility Moves to Composite Insulators", Interview in Insulator News & Market Report, Nov/Dec. 1997.
- 25 J. BURNHAM: "Using Transmission Polymer Insulators to Reduce Costs and Increase Reliability", Int. Symp. on Modern Insulator Technologies, Miami, November, 1997.
- 26 Florida Power & Light: Recent Experience with "Salt Storm" Outages, Insulator News & Market Report, Vol. 5., No. 3, May/June 1997.
- 27 A. E. VLASTOS, E. M. SHERIF: "Natural Ageing of EPDM Composite Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, 1990.
- 28 J. S. LOOMS: "Insulators for High Voltages", Peter Pergrius on behalf of IEEE, 1988. (book).
- 29 A. SHÜTZ: "Discussion Contribution to the Meeting of SC 33 during CIGRE 1996.", Insulator News & Market Report, Nov./Dec. 1996.
- 30 B. POKARIER: "Experience and Applications with Non-Ceramic Insulators at Powerlink Queensland", Insulator News & Market Report, July/August, 1996.
- 31 R. MUNTEANU: "Silicone Rubber Insulators Reduce Life Cycle Costs", Transmission and Distribution, No. 1994.
- 32 New Los Angeles Transmission Project Goes Entirely to Silicone Insulators, Insulator News & Market Report, Vol. 2, No. 3., May/June, 1994.
- 33 J. T. BURNHAM, P. GIVENS: "Present Worth Life Cycle Cost Evaluation of Polymeric and Porcelain Insulators", Insulator News & Market Report, Vol. 3, No. 6., November/ December, 1995.

COMPOSITE POLYMER INSULATORS IN TRANSMISSION AND DISTRIBUTION OF ELECTRIC ENERGY

In the work short history of composite insulators is given. Advantages and disadvantages of conventional insulators are given (glass and porcelain) as well as of composite polymer insulators. After that the analysis and comparison between conventional and composite polymer insulators regarding their mechanical and electrical characteristics, behavior under difficult circumstances as well as their economic evaluation based on data published in worldwide literature is given. Finally, some still open questions regarding the application of polymer insulators in transmission and distribution of electric energy are discussed.

KOMPOSITE POLYMERE ISOLATOREN IN ÜBERTRAGUNGS- UND VERSORGUNGSNETZEN

Im Artikel ist eine kurzgefasste Geschichte der Entwicklung von kompositen polymeren Isolatoren dargestellt. Gegeben ist eine Übersicht der Vor- und Nachteile konventioneller (Glas- und keramischen) Isolatoren, sowie kompositen polymerer Isolatoren. Im Bezug auf ihre mechanische und elektrische Eigenschaften, auf ihr Verhalten in erschwerten Betriebsbedingungen, sowie auf die Wirtschaftlichkeit, an Hand der in den allweltlich anerkannten Fachzeitschriften veröffentlichten Angaben, ist danach eine Untersuchung und ein Vergleich der konventionellen und der kompositen polymeren Isolatoren dargestellt. Am Ende wurden manche, noch immer offene Fragen bezüglich der Anwendung konventioneller und kompositen polymerer Isolatoren in Übertragungs- und Versorgungsnetzen erörtert.

Naslov pisaca:

Prof. dr. sc. Zijad Haznadar, dipl. ing.
prof. dr. sc. Sead Berberović, dipl. ing.
prof. dr. sc. Željko Štih, dipl. ing.
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3
10000 Zagreb, Hrvatska

prof. dr. sc. Kemo Sokolija, dipl. ing.
Elektrotehnički fakultet
Zmaja od Bosne b.b.
71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Uredništvo primilo rukopis:
 2003 – 07 – 17.