

Renato Ćučić
HEP ODS d.o.o.
renato.cucic@hep.hr

Kruno Trupinić
HEP ODS d.o.o.
kruno.trupinic@hep.hr

Ante Višić
HEP ODS d.o.o.
ante.visic@hep.hr

Hrvoje Jelić
HEP ODS d.o.o.
hrvoje.jelic@hep.hr

Anđelko Tunjić
HEP ODS d.o.o.
andelko.tunjic@hep.hr

Miroslav Pavelić
HEP ODS d.o.o.
miroslav.pavelic@hep.hr

Stipe Klarić
HEP ODS d.o.o., Elektra Šibenik
stipe.klaric@hep.hr

NORMATIVNI OKVIRI ZA SREDNJENAPONSKE PODMORSKE KABELE

SAŽETAK

Suvremeni srednjenaponski podmorski kabele u pravilu su trožilne izvedbe sa ugrađenim jednim ili više optičkih kabela i fleksibilnim tvorničkim spojnica koje omogućuju neprekinutu izradu potrebne duljine kabela. Stoga se i normativni okviri sastoje od okvira za energetske dio kabela i okvira za optički dio kabela.

Tri ključna dokumenta su međunarodna norma IEC 63026:2019 „Submarine power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72,5$ kV) - Test methods and requirements“ i CIGRE Tehnička brošura br. 722:2018 „Recommendations for additional testing for submarine cables from 6kV ($U_m=7.2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72.5$ kV)“ za energetske dio kabela, te preporuka ITU-T G.976:2014 „Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems“ za optički dio kabela.

Ključne riječi: SN podmorski kabel, optički kabel, norme, tehničke brošure, preporuke

NORMATIVE FRAMEWORKS FOR MEDIUM VOLTAGE SUBMARINE CABLES

SUMMARY

Modern medium voltage submarine cables are usually three-core designs with one or more integrated optical cables and flexible factory joints that allow for continuous production of the required cable length. Therefore, the normative frameworks consist of a framework for the power part of the cable and a framework for the optical part of the cable.

The three key documents are the international standard IEC 63026:2019 „Submarine power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72.5$ kV) – Test methods and requirements“ and CIGRE Technical Brochure No. 722:2018 „Recommendations for additional testing for submarine cables from 6kV ($U_m=7.2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72.5$ kV)“ for the power part of the cable, and the recommendation ITU-T G.976:2014 „Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems“ for the optical part of the cable.

Key words: MV submarine cable, optical cable, standards, technical brochures, recommendations

1. UVOD

U prvom dijelu referata opisane su preporuke za tehničke karakteristike SN podmorskih kabela sukladno pripadajućim normama, tehničkim brošurama i preporukama. Drugi dio obrađuje propisana ispitivanja za dokazivanje sukladnosti SN podmorskih kabela, kao što su tipska odnosno kvalifikacijska ispitivanja. U trećem dijelu referata opisana su propisana ispitivanja za potrebe kontrole kvalitete tijekom i nakon proizvodnje, tijekom transporta i skladištenja te nakon polaganja SN podmorskog kabela, kao što su rutinska i ispitivanja na uzorcima, load out ispitivanja, te ispitivanja nakon instalacije kabela.

2. PREPORUKE ZA TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SN PODMORSKOG KABELSKOG SUSTAVA

Prilikom utvrđivanja tehničkih parametara srednjenaponskih podmorskih kabela potrebno je koristiti odredbe međunarodne norme IEC 63026:2019 [1], u kombinaciji s preporukama CIGRE Tehničke brošure TB 722 [2]. Norma IEC 63026 po prvi puta je izdana 2019. godine. Predstavlja važan dokument koji utvrđuje metode ispitivanja i zahtjeve na podmorske kabelske sustave odnosno na podmorske kabele s ekstrudiranom izolacijom i njihov pribor za fiksne podmorske instalacije, za nazivne napone od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 60 kV ($U_m = 72,5$ kV).

2.1 Zahtjevi na konstrukciju SN podmorskog kabelskog sustava prema normi IEC 63026

Prilikom utvrđivanja potrebne konstrukcije podmorskog kabela kao i cjelovitog kabelskog sustava potrebno je uzimati u obzir brojne parametre. Također je potrebno pratiti trendove u razvoju materijala i tehnologija za primjenu u raznim uvjetima, s obzirom da se tehnologija kabela stalno razvija i iterira.

Normom IEC 63026 propisano je da vodiči relevantnih podmorskih kabela moraju biti klase 1 ili klase 2 od običnog ili metalom obloženog žarenog bakra ili od običnog aluminija ili aluminijske legure u skladu s IEC 60228. Za sve vodiče moraju se poduzeti mjere za postizanje uzdužne vodonepropusnosti, osim ako kupac i proizvođač ne dogovore drugačije.

Izolacija mora biti ekstrudirani čvrsti dielektrik: XLPE za suhi i polusuhi dizajn radijalne vodonepropusnosti (prema Slikama 1a i 1b) te XLPE s dodatkom water tree retardanta, EPR ili HEPR za mokri dizajn (prema Slici 1c). Za kabele s najvećim naponom za opremu U_m do 36 kV, nazivna debljina izolacije je ona navedena u IEC 60502-2 alternativno, prema dogovoru između kupca i proizvođača, debljina izolacije može se odabrati na temelju dopuštenog električnog naprezanja na U_m . Za kabele iznad $U_m = 36$ kV i do $U_m = 72,5$ kV nazivna debljina izolacije je ona koju je deklarirao proizvođač. Za sve kabele odabrana debljina izolacije mora rezultirati nazivnim električnim poljem u izolaciji i to na zaslonu vodiča ne većim od 8,0 kV/mm i na zaslonu izolacije ne većim od 4,0 kV/mm.

Poluvodljivi zasloni vodiča i izolacije trebaju biti čvrsto zalijepljeni na izolaciju metodom trostruke ekstruzije kako bi se bolje oduprli mehaničkim naprezanjima tijekom polaganja kabela.

Metalni električni zaslon postavlja se preko pojedinačnih jezgri ili sklopa jezgri a može se sastojati od jedne ili više traka, ili pletenice, ili koncentričnog sloja žica, ili kombinacije žica i trake(a) ili metalnog omotača. Mogu se poduzeti mjere za postizanje uzdužne vodonepropusnosti metalnog zaslona ispod i iznad zaslona. Prilikom odabira materijala zaslona, posebnu pozornost treba posvetiti mogućnosti korozije, kako bi se osigurala zadovoljavajuća mehanička i električna izvedba. U posebnim slučajevima, armatura od čelične žice trožilnih kabela može se koristiti kao metalni zaslon.

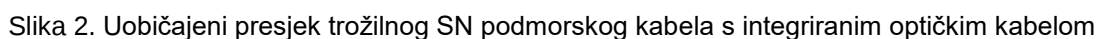
Na zahtjev se preko metalnog zaslona postavlja plašt kabelske žile (plavi sloj na Slici 1), preporuča se plašt na bazi high density polietilena (HDPE) tipa ST7. Alternativno, dopušten je poluvodljivi PE zaštitni omotač. Preporuča se da ovaj materijal ima ista neelektrična svojstva kao za ST7, osim sadržaja čađe. Posebnu pozornost treba posvetiti ograničavanju prijelaznih prenapona kod dugih podmorskih kabela.

U slučaju suhog ili polusuhog dizajna ispod plašta kabelske žile postavlja se metalni sloj za radijalnu vodonepropusnost, koji može biti ekstrudiran (crveni sloj na Slici 1a) ili u obliku metalne folije uzdužno zavarene ili uzdužno preklopljene i zalijepljene (crveni sloj na Slici 1b).



Armatura kabela izrađuje se od okrugle ili ravne žice, žice moraju biti od pocinčanog čelika, nehrđajućeg čelika, bakra ili pokositrenog bakra ili drugih metalnih legura otpornih na koroziju. U nekim okolnostima kako bi se kabel učinio lakšim, armatura može biti mješavina metalnih žica i plastičnih žica. Armatura može biti od jednostrukog ili dvostrukog sloja žica koje se mogu nanositi u istom ili suprotnom smjeru, ovisno o uvjetima polaganja i mehaničkim svojstvima koja se zahtijevaju za kabel. Armatura se nanosi na posteljicu kako bi se izbjeglo oštećenje kablaskih žila. Za jednožilne kabele treba koristiti armaturu od nemagnetskih materijala. Prilikom odabira materijala armature posebno treba voditi računa o mogućnosti korozije, ne samo zbog mehaničke, već i zbog električne sigurnosti.

Uobičajeni presjek trožilnog SN podmorskog kabela s integriranim optičkim kabelom prikazan je na Slici 2.



3

2.2 Kriteriji za dizajn i izbor SN podmorskog kablenskog sustava

2.2.1 Utjecaj vlage na izolaciju

Suvremeni SN podmorski kabeli se s aspekta radijalne vodonepropusnosti dijele na suhe, polusuhe i mokre izvedbe. Suha izvedba je s ekstrudiranim olovnom ili valovitim aluminijskim slojem kada ovaj sloj također preuzima ulogu električnog zaslona (Common design - CD). Polusuhi dizajn je s aluminijskom folijom uzdužno zavarenom (CD ili Separate Design - SD) ili s aluminijskom folijom s PE kopolimerom pričvršćenom na PE plašt, uzdužno preklopljenom i zalijepljenom (SD). Mokra izvedba je bez metalnog sloja za radijalnu vodonepropusnost. EPR izolacija se obično koristi za mokre dizajne, dok se XLPE izolacija koristi za polusuhe i suhe dizajne. Osim toga, XLPE izolacija s WTR može se koristiti za mokre izvedbe [3, 4].

Polimerni plašt kablenske žile može pružiti radijalnu vodenu barijeru. Polimerni materijali su nepropusni za vodu, ali vodena para može difundirati kroz njih. Za podmorske kabele srednjeg napona može se prihvatiti mala količina vodene pare koja difundira kroz polimerni omotač jer je jakost električnog polja u kabelima srednjeg napona mala. Najčešći polimer za plašt kabela, HDPE, ima prilično nisku propusnost vodene pare ($145 \mu\text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$).

Laminirani aluminijski omotači sastoje se od tanke aluminijske folije (debljine cca. 0,25 mm) prethodno laminirane slojem PE-kopolimera. Tijekom proizvodnje kabela, ovaj laminat se oblikuje oko kablenske jezgre s polimernim slojem na vanjskoj strani. Rubovi folije su zalijepljeni zajedno s preklapanjem. U istom procesu, PE plašt se ekstrudira izravno na PE laminatni sloj aluminijske folije. Al-PE folija je tako čvrsto vezan za vanjski PE plašt. Samo s ovim lijepljenjem aluminijska folija može izdržati savijanje kabela bez nabora. Iako je aluminijska folija apsolutno nepropusna za vodu, male količine mogu difundirati u kabel kroz lijepljeni šav. Sredstva za upijanje vode unutar kabela snižavaju razinu vlage na prihvatljivu razinu za sigurnu upotrebu aluminijskih laminiranih folija u podmorskim srednjenaponskim kabelima.

Dobro sastavljena formulacija osnovnog izolacijskog materijala i WTR aditiva može imati izvrsne dielektrične vrijednosti, dobru preradljivost, i kvalitetna svojstva protiv starenja u vodi. Za izolacijski sustav visokih performansi i visoke pouzdanosti preporučuje se korištenje dobro definirane kombinacije XLPE izolacijskog materijala i poluvodljivog materijala za zaslon koji preporučuje iskusan proizvođač kabela.

2.2.2 Mehanički dizajn

Najistaknutiji mehanički konstrukcijski element podmorskih kabela je armatura, koji osigurava stabilnost napetosti i mehaničku zaštitu. Za svaki projekt podmorskog kabela armatura bi trebala biti projektirana s obzirom na stabilnost napetosti, uzorak vanjske prijetnje i zahtjeve zaštite za svaki sektor planirane trase kabela.

Podmorski kabeli su tijekom postavljanja izloženi zateznim silama ne samo težinom visećeg kabela, već i dodatnim dinamičkim silama od vertikalnih pomaka plovila. Ukupna sila tijekom instalacije može dramatično premašiti statičku silu kabela koji visi na morsko dno. Armatura također mora pružati dostatnu mehaničku zaštitu od očekivane vanjske agresije alata za polaganje kabela, ribolovne opreme i sidara.

Ukoliko je vanjski omotač kabela dizajniran s dva sloja polipropilenskih niti, dopušta se morskoj vodi da uđe u armaturni sloj kabela. Sloj cinka je primarna zaštita čeličnih žica od korozije. Sekundarna zaštita postiže se oblaganjem armaturnih žica vrućim bitumenom tijekom proizvodnje. Vijek trajanja bitumenske zaštite uvelike ovisi o mehaničkim utjecajima na kabel. Sloj bitumena može biti erodiran tijekom polaganja kabela ili kasnije tijekom pogona kada je neukopani kabel izložen vodenoj struji punoj pijeska. Tamo gdje je sloj bitumena oštećen, sloj cinka preuzima zaštitu od korozije. Brzina korozije cinkanih prevlaka u morskoj vodi ovisi o mnogim čimbenicima kao što su salinitet, temperatura, izmjena vode oko kabela itd. Referentne vrijednosti za brzinu korozije cinkovih slojeva su 5-50 $\mu\text{m}/\text{god}$. Kada se cink iscrpi, čelik se može istrošiti brzinom od 10 $\mu\text{m}/\text{god}$ i više. Slobodan pristup morskoj vodi koja sadrži otopljeni kisik igra važnu ulogu u koroziji. Ako tlo ili zaštitni slojevi sprječavaju izmjenu vode oko kabela, postojeći kisik u blizini kabela se ne obnavlja i stopa korozije bit će značajno smanjena.

Podaci o kemijskom sastavu morske vode u Jadranskom moru koji utječu na koroziju su sljedeći:

- salinitet od 33 do 39 ‰,

- pH od 7,5 do 8,5,
- temperatura na dnu 10 do 12 °C,
- koncentracija otopljenog kisika na dnu 5 do 7 mg/L,
- tvrdoća vode kao koncentracija otopljenog kalcija oko 0,5 g/L i magnezija oko 1,1 g/L.

Trend promjena ovih vrijednosti u budućnosti ukazuje da se očekuje povećanje saliniteta i temperature, što će značajno povećati utjecaj korozije, te smanjenje koncentracije otopljenog kisika na morskom dnu što je povoljno za zaštitu od korozije. Uz činjenicu da u Jadranskom moru nema izraženih morskih strujanja na mjestima podmorskih kabela, može se zaključiti da su ukupni uvjeti za pojavu i razvoj korozije armaturnih žica srednje teški, za umjereno toplo more sa značajnim salinitetom.

2.2.3 Toplinski dizajn

Sušтина toplinskog dimenzioniranja kabela je odabir materijala i presjeka vodiča na temelju predviđenih budućih opterećenja kabela tijekom njegovog životnog vijeka, tako da temperatura izolacije ne prijeđe najveću dopuštenu temperaturu izolacije, koja u slučaju XLPE iznosi 90°C.

Osnovno pravilo za životni vijek izolacijskih materijala kao što je XLPE je: „Povećanje radne temperature za 8–10 °C skraćuje životni vijek kabela za pola“. Prema tom pravilu, kabel s deklariranim životnim vijekom od 30 godina pri temperaturi vodiča od 90°C imao bi životni vijek duplo duži pri temperaturi vodiča od 80–82°C.

Upravljanje životnim vijekom kabela s aspekta temperature izolacije svodi se na operativno upravljanje tokovima snage kroz kabel s pravilno dimenzioniranim vodičima.

2.2.4 Električni dizajn

Sušтина električnog dimenzioniranja kabela je u odabiru nazivnog napona kabela prema pogonskom naponu distribucijske mreže, stanju uzemljenja mreže i primijenjenoj zaštiti od kvarova, prvenstveno jednopolnih koji generiraju prijelazne prenapone u kabelu.

Treba se pridržavati osnovnog pravila za životni vijek izolacijskih materijala kao što je XLPE, a to je: „Povećanje radnog napona za 8–10% skraćuje životni vijek kabela za pola“. Upravljanje vijekom trajanja kabela s aspekta napona na izolaciji svodi se na maksimalno smanjenje trajanja privremenih prenapona na kabelu zaštitnim uređajima.

Drugi aspekt električnog projektiranja je izračun potrebne debljine izolacije. IEC 63026 za kabele do uključivo U_m 36 kV propisuje nazivne debljine izolacije, dok za kabele viših iznosa U_m propisuje maksimalne vrijednosti električnog polja od 8 kV/mm na unutarnjem rubu i 4 kV/mm na vanjskom rubu izolacije.

2.2.5 Dizajn tvorničkih spojnica

Tvorničke spojnice na kabelskim žilama često su potrebne iz sljedećih razloga:

- ograničenje kontinuirane duljine ekstruzije, zbog čišćenja filtera itd.,
- ograničenje skladišnog kapaciteta (npr. procesne platforme) pojedinačnih duljina,
- ograničenje opreme i procesa za otplinjavanje,
- ograničenje snage AC ispitne opreme,
- eventualna oštećenja kabela tijekom proizvodnje i rukovanja.

Tvorničke spojnice moraju imati iste mehaničke i električne karakteristike kao originalni kabel i potpuno su fleksibilne. Tvornička spojica izrađuje se na kabelskoj žili prije procesa armiranja. Uobičajeno se koristi argonsko zavarivanje vodiča po slojevima kako bi se zadržala dobra izvedba savijanja i osigurala odgovarajuća vlačna čvrstoća spoja vodiča koja nakon zavarivanja ne smije biti manja od 80 MPa.

Promjer svakog sloja nakon zavarivanja mora biti približno ujednačen s izvornim, a tolerancija promjera obično nije veća od 0,5 mm. Nakon spoja vodiča, izrađuju se svi slojevi zaslona, izolacija, trake za blokiranje vode, aluminijske folije i PE plašta. Tvorničke spojnice se izrađuju u čistim prostorijama s kontroliranim vlagom i temperaturom.

3. DOKAZIVANJE SUKLADNOSTI SN PODMORSKOG KABELSKOG SUSTAVA

Brzina uvođenja novih dizajna podmorskih SN kabela je visoka prvenstveno zbog razvoja pučinskih vjetroparkova, te se prije desetak godina pokazalo da ne postoji odgovarajuća norma ili preporuka za podmorske kabelske sustave. Stoga je formirana radna skupina IEC-a (IEC TC20 WG16 TF 63026) kako bi se izradila takva norma. Radna skupina IEC-a temeljila je svoj rad na izradi norme IEC 63026:2019 na postojećim normama i preporukama; uglavnom IEC 60502-2, IEC 60840, CIGRE TB 490 i TB 623. Radna skupina je ubrzo uvidjela da neke važne teme specifične za određene dizajne SN kabela nisu pokrivene spomenutim dokumentima. Iz tog razloga IEC je zatražio od CIGRE SC B1 osnivanje radne skupine koja će obraditi važne teme koje nisu obuhvaćene navedenim dokumentima.

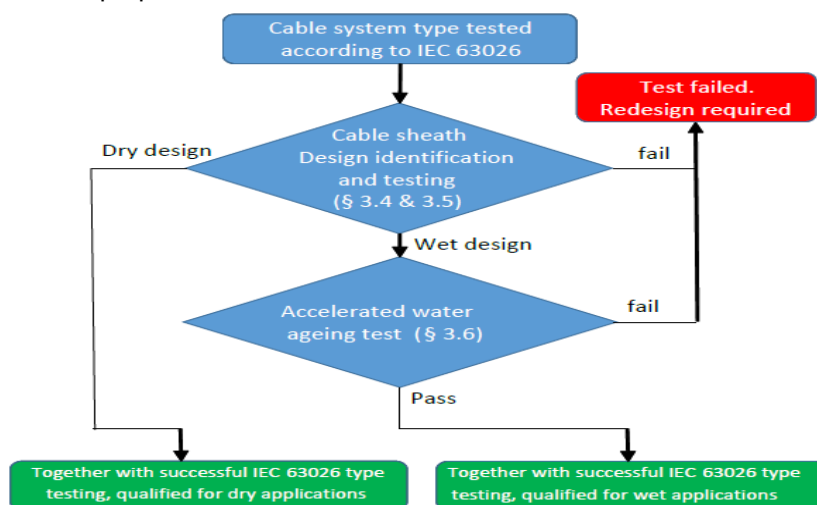
Radna skupina CIGRE je potom izradila tehničku brošuru TB 722 - Preporuke za dodatna ispitivanja podmorskih kabela od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 60 kV ($U_m = 72,5$ kV). U predmetnoj brošuri utvrđena su dodatna potrebna ispitivanja koje norma IEC 63026 ne pokriva. Ispitivanja podmorskih SN kabelskih sustava iz tog se razloga provode prema oba ova dokumenta u kompletu, odnosno prema brošuri CIGRE TB 722 i prema normi IEC 63026.

Podmorski SN kabele dio su brzo rastuće i vrlo vrijedne imovine, stoga takva mrežna komponenta mora biti pouzdana. Iz tog razloga CIGRE TB 722 preporučuje skup dodatnih ispitivanja koja osiguravaju da ovi kabele imaju istu razinu kvalitete kao ostale vrste kabela izrađenih i ispitanih prema najbližim IEC normama kao što su IEC 60502-2 i IEC 60840. Dakle, CIGRE TB 722 popunjava praznine u normizaciji SN podmorskih kabela prema IEC 63026, prvenstveno s aspekta izdržljivosti kabela i kabelske spojnice na radijalni prodor vode.

3.1. Tipiska i kvalifikacijska ispitivanja

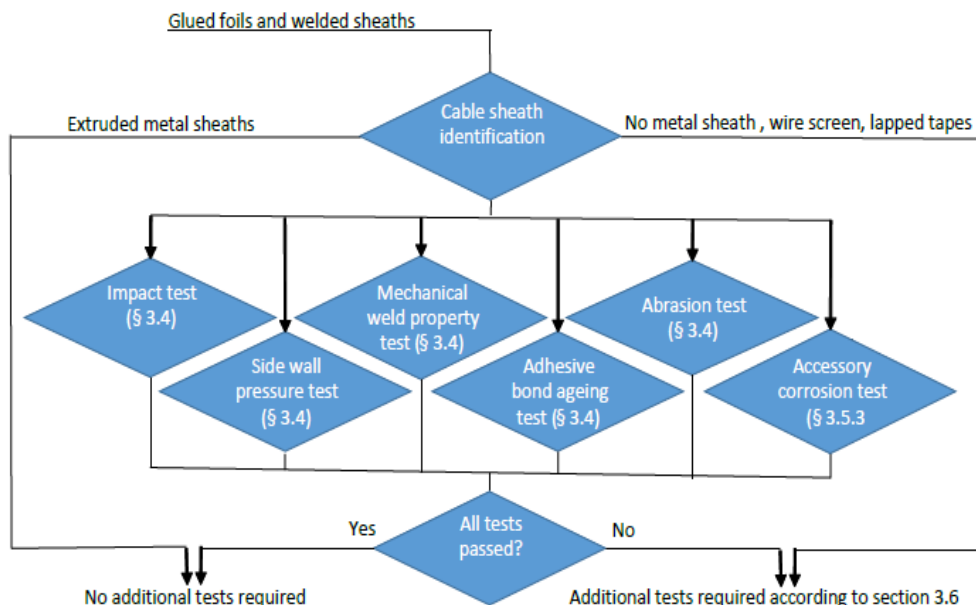
Ispitivanje SN podmorskih kabelskih sustava u okviru norme IEC 63026 i CIGRE TB 722 temelji se na sistemskom pristupu, u ovom slučaju kabela i spojnica, bilo tvorničkih bilo terenskih ili reparaturnih. Pregled dodatnih kvalifikacijskih ispitivanja prema CIGRE TB 722 i njihov suodnos prema tipskim ispitivanjima po normi IEC 63026 prikazan je dijagramom toka na Slici 3, dok je detaljnija razrada ovih kvalifikacijskih ispitivanja prikazana na Slici 4. Početno se, temeljem pregleda konstrukcijskih elemenata kabela u području plašta kabelske žile identificira pripadnost kabela dizajnu s aspekta radijalne (poprečne) vodonepropusnosti kao jedne od ključnih sastavnica SN podmorskih kabelskih sustava, prema Slici 1:

- suhi (dry) dizajn ukoliko kabel iznad izolacijskog sustava ima ekstrudirani metalni sloj za radijalnu vodonepropusnost, za koji ne treba dodatna provjera radijalne vodonepropusnosti kvalifikacijskim ispitivanjima,
- suhi (polusuhi, semi-dry) dizajn ukoliko kabel iznad izolacijskog sustava ima metalni sloj za radijalnu vodonepropusnost koji je na svom uzdužnom spoju preklopljen i zalijepljen ili zavaren,
- mokri (pulumokri, wet, semy-wet) dizajn ukoliko kabel iznad izolacijskog sustava nema metalni sloj za radijalnu vodonepropusnost.



Slika 3. Tipiska i kvalifikacijska ispitivanja prema IEC 63026 i CIGRE TB 722

Kabelski sustavi suhog dizajna b) podliježu dodatnoj provjeri vodonepropusnosti kvalifikacijskim ispitivanjima kabela prema poglavlju 3.4. brošure i kabelske spojnice prema poglavlju 3.5 brošure, sukladno Slici 4. Ukoliko zadovolje sva ispitivanja, mogu biti kvalificirani za suhi dizajn kao i kabele a), u suprotnom, ukoliko ne zadovolje jedno ili više ovih ispitivanja, obvezna je provedba kvalifikacijskih ispitivanja starenja izolacije pod utjecajem vode prema poglavlju 3.6 brošure, kao i za kabele mokrog dizajna c).



Slika 4. Detaljni prikaz kvalifikacijskih ispitivanja prema CIGRE TB 722

Ukoliko zadovolje ova ispitivanja, mogu biti kvalificirani za mokri dizajn, u suprotnom riječ je o grešci u dizajnu i izvedbi kabelskog sustava i isti se ne može kvalificirati za podmorsku izvedbu te mora na redizajn.

Ova se kvalifikacijska ispitivanja obavezno provode uz sva obavezna tipska ispitivanja prema normi IEC 63026 prema Slici 3, te su nakon uspješno provedenih svih ovih tipskih ispitivanja kvalificirani kao SN podmorski kabelski sustavi suhe ili mokre izvedbe. Obavezna tipska ispitivanja SN podmorskih kabelskih sustava prema normi IEC 63026 dijele se u četiri grupe, s propisanim slijedom ispitivanja i uzorcima za ispitivanje:

- mehanička ispitivanja vlačnom silom, vlačnim savijanjem i torzijskom silom kod namatanja kabela na fiksni spremnik, prema CIGRE TB 623,
- električna ispitivanja prema normi IEC 60840,
- ispitivanja uzdužnog prodiranja vode u području vodiča i električnog zaslona prema CIGRE TB 490,
- neelektrična ispitivanja prema normi IEC 60840.

Za sva tipska ispitivanja mora se izdati Certifikat o tipskim ispitivanjima za ponuđeni ili primjenjivi tip podmorskog kabelskog sustava. Neovisno tijelo mora izdati certifikat ili neovisno tijelo mora nadzirati njegovo izdavanje.

Za optički kabel koji se može ugraditi u prostoru za ispunu s tri kabelske žile provode se obvezna kvalifikacijska ispitivanja prema preporuci ITU-T G.976:2014.

4. KONTROLA KVALITETE SN PODMORSKOG KABELSKOG SUSTAVA

Proizvođač kabelskog sustava mora imati dokumentiran i implementiran sustav kvalitete prema ISO 9001 ili ekvivalentnom. Upravljanje kvalitetom odnosi se na kvalitetu sirovina, poluproizvoda i finalnih

proizvoda i povezanih procesa. Proizvođač kabelskog sustava je dužan dostaviti kupcu na usuglašavanje i odobrenje prije početka aktivnosti proizvodnje:

- Plan kontrole kvalitete s planom inspekcije i ispitivanja (ITP) kabelskog sustava tijekom proizvodnje,
- Plan i program završnog tvorničkog ispitivanja kabelskog sustava (FAT).

4.1 Plan inspekcije i ispitivanja (ITP)

Plan inspekcije i ispitivanja (ITP) kao najvažniji dokument u procesu kontrole kvalitete sastoji se od tri glavna poglavlja:

- Certifikati i ispitivanja ulaznih sirovina,
- Inspekcija proizvodnje uključujući ispitivanja tijekom proizvodnje,
- Plan završnog tvorničkog ispitivanja kabelskog sustava (FAT) i ispitivanja nakon premotavanja kabela na prijevozno sredstvo (Load out test).

S obzirom da ima mnogo evidencija počevši od faze prije početka proizvodnje, zatim kontinuirano kroz razne faze proizvodnog procesa, zatim FAT faze i na kraju faze utovara, potrebno je sustavno voditi brigu o evidenciji. Zapise treba redovito dostavljati kupcu na pregled i provjeru putem definiranog komunikacijskog kanala.

Proizvođač će kupcu redovito dostavljati informacije o završenim važnim fazama proizvodnog procesa. Što se tiče izrade kabelske tvorničke spojnice, spojnicu treba montirati iskusno osoblje. Kontrola dimenzija, provjera temperatura i tlakova tijekom proizvodnje spojeva itd. moraju se zabilježiti i provesti prema uputama. Svi ovi zapisi trebaju biti dostupni kupcu na pregled.

Sadržaj svih poglavlja ITP-a ovisi o konstrukciji kabelskog sustava, u nastavku su dani primjeri za konstrukciju trožilnog SN kabela sa WTR-XLPE izolacijom, SD dizajnom sa bakrenim električnim zaslonom i AL-PE folijom za radijalnu vodonepropusnost, nevodljivim HDPE plaštem kabelskih žila, armaturom od vruće pocinčanih čeličnih žica i vanjskim omotačem kabela od PP prediva, ugrađenim optičkim kabelom u prostoru ispune i tvorničkim spojnica na kabelskim žilama.

4.1.1 Certifikati i ispitivanja ulaznih sirovina

Ovo poglavlje sadrži certifikate proizvođača sirovina i ulazne zapise proizvođača kabelskog sustava o ispitivanju sirovina za sirovine koje se koriste u proizvodnji energetskih kabela: (bakrene šipke, smjesa za poluvodljive zaslone, WTR-XLPE izolacijska smjesa, poluvodljive vodobubrive trake, bakrena žica i traka, Al-PE laminirana folija i ljepilo, HDPE smjesa za plašt, punilo, vezivna traka, bitumen, vruće pocinčane čelične žice armature prema normi HRN EN 10257-2, PP niti) i optički kabel (optička vlakna, gel, cijev od nehrđajućeg čelika, vruće pocinčane čelične žice, HDPE smjesa za plašt).

4.1.2 Inspekcija proizvodnje uključujući ispitivanja tijekom proizvodnje

Ovo poglavlje sadrži zapise sa sljedećih faza proizvodnje kabelskog sustava:

- Proces izrade vodiča (drawing i stranding); sa zapisima o nadzornim mjerenjima dimenzija žica i vodiča, postavljanju slojeva za uzdužnu vodonepropusnost i mjerenjima električnog otpora pojedinačnih žica i cijelog vodiča,
- Ekstruzija izolacijskih i poluvodljivih slojeva; sa zapisima o mjerenjima debljine slojeva i ekscentriciteta izolacijskog sloja te provedenim Hot set ispitivanjima izolacije, te zapisima sa postupka otplinjavanja,
- Izrada električnog zaslona; sa evidencijom dimenzionalne i konstrukcijske kontrole i mjerenja električnog otpora zaslona,
- Izrada sloja za radijalnu vodonepropusnost i ekstruzija HDPE plašta kabelskih žila; s evidencijom mjerenja dimenzija i kontrole kvalitete izvedbe, ispitivanja prijanjanja i čvrstoće na ljuštenje Al folije i ispitivanja izmjeničnim naponom HDPE plašta,
- Optički kabel; sa zapisima o kontroli izrade, mjerenju dimenzija i ispitivanju prigušenja svih optičkih vlakana,

- Izrada tvorničkih spojnica; sa zapisima o kontroli kvalitete i uvjetima pri izradi,
- Montaža, armiranje i izrada vanjskog omotača kabela; sa zapisima o kontroli izrade i mjerenju dimenzija.

Ispitivanja tijekom proizvodnje kabelskog sustava grupirana su kako slijedi:

- Ispitivanja na ekstrudiranim duljinama kabelskih žila prije izrade tvorničkih spojnica; sa zapisima ispitivanja djelomičnog pražnjenja (PD test) na uzorcima od 10 m i ispitivanja izmjeničnim naponom (AC test),
- Ispitivanja uzorka tvorničke spojnice s uzorkom kabelske žile duljine 10 m prema poglavlju 11.1 IEC 63026; sa zapisima o ispitivanju izmjeničnim naponom, ispitivanju djelomičnog pražnjenja, ispitivanju podnosivim prenaponom, Hot set ispitivanju, ispitivanju vlačnom silom i vizualnom pregledu nakon ispitivanja,
- Ispitivanja tvorničkih spojnica na kabelskim žilama; sa ispitivanjem rendgenskim zrakama u skladu s Dodatkom F IEC 63026,
- Ispitivanja na duljinama za isporuku kabelskih žila nakon izrade tvorničkih spojnica; sa zapisima o ispitivanju izmjeničnim naponom, TDR ispitivanjem na kabelskim žilama, OTDR ispitivanjem s mjerenjem prigušenja i ispitivanjem kontinuiteta svih optičkih vlakana.

4.2 Završno tvorničko ispitivanje kabelskog sustava (FAT) i ispitivanje nakon utovara u prijevozno sredstvo (Load out test)

U završnom tvorničkom ispitivanju (FAT) provode se minimalno sva rutinska ispitivanja i ispitivanja na uzorcima prema poglavljima 9.4 i 10 IEC 63026 i poglavljima 3.7 i 3.8 CIGRE TB 722. Ispitivanja na uzorcima provode se na jednom uzorku kabela za kabelske sustave do 20 km duljine, za veće duljine na dva uzorka kabela s oba kraja kabela. Neka ispitivanja na uzorcima koja se izvode na duljini isporuke kabela mogu se smatrati rutinskim ispitivanjima, kao što je navedeno u nastavku. Ovlašteni predstavnici kupca svjedoče FAT-u.

- Rutinska ispitivanja:
 - o Ispitivanje djelomičnog pražnjenja (UWB metoda),
 - o Ispitivanje izmjeničnim naponom,
 - o Mjerenje istosmjernog otpora vodiča i metalnog zaslona,
 - o Mjerenje kapaciteta,
 - o Mjerenje otpora izolacije,
 - o TDR ispitivanje na kabelskim žilama,
 - o OTDR ispitivanje s mjerenjem prigušenja optičkih vlakana.
- Ispitivanja na uzorcima:
 - o Pregled konstrukcije kabela sa dimenzijskim provjerama,
 - o Hot set ispitivanje izolacije WTR-XLPE;
 - o Ispitivanje prijanjanja i otpornosti na ljuštenje Al-PE folije.

U sklopu Load out ispitivanja nakon premotavanja kabela na transportno sredstvo provode se:

- o Mjerenje otpora izolacije,
- o TDR ispitivanje na kabelskim žilama,
- o OTDR ispitivanje s mjerenjem prigušenja optičkih vlakana,
- o Vizualni pregled (označavanje, pakiranje).

5. ZAKLJUČAK

Tehnički zahtjevi na izvedbu podmorskih kabelskih sustava baziraju se na izdanjima relevantnih međunarodnih normi i preporuka. Sukladnost se dokazuje propisanim ispitivanjima, koja se provode u više faza, od pripreme faze, preko faze proizvodnje pa sve do završnog proizvoda spremnog za

isporuku. Tehnologija kabela u stalnom je rapidnom razvoju, stoga je IEC 2019. godine objavio novu normu za srednjenaponske podmorske kabele IEC 63026, a koja je u Hrvatskoj prihvaćena 2024. godine pod oznakom HRN IEC 63026:2024 naziva „Podmorski energetske kabele s ekstrudiranom izolacijom i njihov pribor za nazivne napone od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 60 kV ($U_m = 72,5$ kV) -- Metode ispitivanja i zahtjevi (IEC 63026:2019)“. Za primjenu kabela koristi se kombinacija više normi i preporuka od kojih je posebno važna preporuka CIGRE TB 722.

Dva su ključna aspekta dugog životnog vijeka SN podmorskog kabela. Prvi aspekt je izbor dizajna otpornog na vodu i mehanička opterećenja. Drugi aspekt je kvalificirani odabir proizvođača kablenskog sustava i kontrola kvalitete tijekom i po završetku proizvodnje kabela.

6. LITERATURA

- [1] IEC 63026:2019 - Submarine power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72,5$ kV) - Test methods and requirements
- [2] CIGRE TB 722 - Recommendations for additional testing for submarine cables from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72.5$ kV), Working group B1.55; April 2018
- [3] Resner L., Paszkiewicz S., 2021., „Radial Water Barrier in Submarine Cables, Current Solutions and Innovative Development Directions“, *Energies*, 14(10), 2761
- [4] Worzyk T., 2009., „Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects (Power Systems)“, Springer, 2009th Edition