

# TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA PROJEKTIRANJE PODMORSKIH 110 kV KABELA

---

**Tomljanović, Mario**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:758241>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA PROJEKTIRANJE PODMORSKIH  
110 kV KABELA**

Rijeka, rujan 2023.

Mario Tomljanović

0069063009

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA PROJEKTIRANJE PODMORSKIH  
110 kV KABELA**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen, dipl. ing. el.

Rijeka, rujan 2023.

Mario Tomljanović

0069063009

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Tehnika visokog napona**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Mario Tomljanović (0069063009)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike  
Modul: Elektroenergetika

Zadatak: **TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA PROJEKTIRANJE PODMORSKIH 110 KV KABELA**

Opis zadatka:

Tehnički zahtjevi na konstrukciju podmorskih 110 kV kabela. Vrste tehnologija podmorskih kabela. Tehnološka rješenja podmorskih kabela. Elementi projekta podmorskih kabela. Razrada izvedbenog rješenja jednog podmorskog kabela.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Mario Tomljanović*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Rok za predaju rada: 12. rujna 2023.

Mentor:

*Vitimir Komen*

Prof. dr. sc. Vitimir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

*Dubravko Franković*

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

# IZJAVA

U skladu s odredbama članka 5. i članka 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih studija na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, te u suglasnosti s Uputama za pripremu diplomskog rada, izjavljujem da sam osobno i neovisno izradio diplomski rad pod naslovom "Tehnički zahtjevi za projektiranje podmorskih 110 kV kabela". Rad je nastao na temelju zadatka za diplomski rad datiranog 15. ožujka 2021. godine, a moj rad je nadzirao mentor prof. dr. sc. Vitomir Komen, dipl. ing. el.

Mario Tomljanović

Mario Tomljanović

Matični broj

0069063009

Rijeka, rujan 2023.

# ZAHVALA

Duboko sam zahvalan prof. dr. sc. Vitomiru Komenu, dipl. ing. el., na neprocjenjivoj podršci koju mi je pružio kao mentor tijekom izrade ovog diplomskog rada. Njegovi savjeti, konzultacije i nesebična pomoć imali su ključnu ulogu u uspješnom oblikovanju ovog rada.

Želim izraziti iskrenu zahvalnost svojim roditeljima za neizmjeran doprinos, kako financijski tako i moralno, tijekom mog školovanja. Njihova podrška bila je temeljna snaga koja me poticala na postizanje uspjeha u ovoj fazi mog života.

Mario Tomljanović

---

Matični broj  
0069063009

Rijeka, rujan 2023.

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KABELSKI ELEKTROENERGETSKI VODOVI 110 KV .....</b>	<b>3</b>
2.1. Osnovne tehničke karakteristike kabela 110 kV .....	3
2.2. Vrste kablinskih vodova prema načinu polaganja.....	8
2.3. Konstrukcijski zahtjevi na jednožilne kopnene kabele.....	12
2.3.1. Vodič .....	13
2.3.2. Zaslon vodiča .....	16
2.3.3. Izolacija .....	17
2.3.4. Zaslon izolacije .....	19
2.3.5. Separator: uzdužna vodena zaštita .....	19
2.3.6. Metalni zaslon .....	20
2.3.7. Čelična cjevčica za svjetlosne niti.....	21
2.3.8. Laminirani plašt: poprečna vodena zaštita .....	21
2.3.9. Vanjski plašt.....	22
<b>3. PODMORSKI KABELSKI VODOVI .....</b>	<b>24</b>
3.1. Vrste podmorskih kabela.....	24
3.2. Usporedba i odnos HVAC i HVDC kablinskog prijenosa.....	27
3.3. Izmjenični AC podmorski kabele 110 kV – konstrukcija i tehnički zahtjevi.....	32
3.3.1. Primjeri izmjeničnih AC podmorskih kabela.....	37
3.4. Istosmjerni DC podmorski kabele 110 kV – konstrukcija i tehnički zahtjevi.....	40
3.4.1. Primjeri istosmjernih DC podmorskih kabela .....	42
<b>4. INFRASTRUKTURA PODMORSKIH KABELSKIH VODOVA.....</b>	<b>49</b>
4.1. Elementi kabela.....	50
4.1.1. Vodič .....	50
4.1.2. XLPE izolacija kabela .....	52
4.1.3. Kabele sa izolacijom od papira .....	53
4.1.4. Oblaganje .....	57
4.1.5. Postavljanje .....	59
4.1.6. Armatura.....	61
4.2. Skladištenje podmorskih kabela .....	66
4.3. Projektiranje trase.....	69
4.4. Tehnologija polaganja .....	71
4.5. Izbor spojnog pribora .....	78

4.5.1.	Spojnice podmorskih kabela .....	78
4.5.1.1.	Tvornički spojevi .....	79
4.5.1.2.	Spojevi za instalaciju na moru .....	83
4.5.1.3.	Ostali dizajni spojeva .....	89
4.5.1.4.	Spojevi na kopnu.....	91
4.5.2.	Završeci kabela.....	94
4.5.2.1.	Priključci za izmjenične (AC) kabele na kopnu .....	94
4.5.2.2.	Priključci za istosmjerne (DC) kabele na kopnu.....	95
4.5.2.3.	Priključci za podmorske kabele .....	96
4.5.3.	Ostala dodatna oprema .....	97
4.5.3.1.	J-čelične cijevi (J-Tubes) .....	97
4.5.3.2.	Vješanje (Hang-Off) .....	98
4.5.3.3.	Zaštita od savijanja .....	99
4.5.3.4.	Uređaji za držanje .....	100
<b>4.6.</b>	<b>Ispitivanja.....</b>	<b>101</b>
4.6.1.	Razvojni testovi.....	101
4.6.2.	Tipska ispitivanja .....	102
4.6.2.1.	Mehanička ispitivanja .....	104
4.6.2.2.	Ispitivanje opterećenja .....	108
4.6.2.3.	Impulsni (udarni) testovi.....	110
4.6.3.	Rutinski testovi.....	112
4.6.3.1.	Visokonaponska rutinska ispitivanja .....	113
4.6.4.	Tvornički prijemni testovi (FAT - Factory Acceptance Tests) .....	114
4.6.5.	Neelektrični testovi .....	117
<b>5.</b>	<b>ELEMENTI IZVEDBENOG PROJEKTA PODMORSKOG KABELSKOG VODA 110 KV .....</b>	<b>119</b>
<b>5.1.</b>	<b>Svrha projekta .....</b>	<b>120</b>
<b>5.2.</b>	<b>Dionica trase s trožilnim 110 kV podmorskim kablom.....</b>	<b>121</b>
5.2.1.	Izvođenje kabela u bušenoj priobalnoj zaštiti .....	122
5.2.2.	Izvođenje kabela u ostatku podmorske trase.....	124
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>128</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>129</b>
	<b>SAŽETAK.....</b>	<b>132</b>
	<b>SUMMARY.....</b>	<b>133</b>





# 1. UVOD

Kabelski vodovi imaju svrhu prijenosa i distribucije električne energije od mjesta proizvodnje do krajnjih potrošača (konzumera). Ovisno o razini nazivnog napona, razlikuju se visokonaponski kabelski vodovi, srednjenaponski kabelski vodovi i niskonaponski kabelski vodovi. Osnovni građevni element je jedan ili nekoliko izoliranih vodiča koji su obloženi zaštitnim elementima s ciljem zaštite od vanjskih utjecaja.

U usporedbi s nadzemnim energetske vodovima, instalacija i održavanje kabela su obično skuplji. Razlog tome je složeni postupak proizvodnje te potreban kabelski pribor za njihovo polaganje. Cjelokupnu kabelsku mrežu čine sami kabele zajedno sa priborom za njihovo polaganje, povezivanje i izvođenje kabela završetaka. Najčešće se primjenjuju za podzemno postavljanje (podzemni kabele), ali često su u primjeni i posebne vrste kabela koji se polažu u specifične uvjete okoline kao što su podmorski kabele (pomorsko napajanje otoka i sl.)

Dimenzioniranje kabela vrši se prema nekoliko kriterija, a primarni je mjesto ugradnje odnosno polaganja kabela. Zatim je važno u obzir uzeti iznos nazivne struje koji kabel mora trajno izdržati bez pregrijavanja, kao i nazivni napon koji će odrediti debljinu izolacije. Kabel ne smije raditi s iznosom struje većim od nazivne vrijednosti jer mu se tada skraćuje vijek trajanja. Zaštitni elementi kabela određeni su utjecajnim faktorima iz okoline u kojoj je kabel položen; mikroklimatski uvjeti temperature, vlage i svjetlosti te mehanička naprezanja i sile koje se javljaju pri mehaničkim opterećenjima.

Ovaj rad temeljit će se na istraživanju podmorskih kabela, obuhvaćajući širok spektar aspekata njihove primjene. Naš fokus bit će usmjeren na analizu različitih tipova podmorskih kabela, pri čemu ćemo pažljivo istražiti karakteristike i prednosti korištenja kabela za prijenos izmjenične struje (AC) i istosmjerne struje (DC). Kroz pažljivu usporedbu ovih dviju tehnologija, istaknut ćemo ključne faktore koji određuju optimalan izbor tehnologije ovisno o konkretnoj primjeni. Osim toga, ilustrirat ćemo praktične primjere stvarnih situacija u kojima se podmorski kabele koriste kao vitalna infrastruktura.

Pomno ćemo analizirati proces proizvodnje podmorskih kabela, naglašavajući kritične čimbenike koji utječu na odabir adekvatnog spojnog pribora za ove kabele. Fokusirat ćemo se na tehničke, ekonomske i praktične elemente koji igraju ulogu u projektiranju optimalne rute za polaganje

kabela. Bit će istraženi osnovni uvjeti i zahtjevi potrebni za osiguranje pouzdanosti i funkcionalnosti kabela tijekom cijelog životnog vijeka.

Detaljno ćemo istražiti tehnologiju i proces polaganja podmorskih kabela, istražujući različite pristupe i metodologije korištene za sigurno postavljanje kabela na dno mora.

Kao posljednja ključna faza, istražiti ćemo proces ispitivanja podmorskih kabela, istražujući različite testove i metode koji se koriste kako bi se osigurala kvaliteta, funkcionalnost i izdržljivost kabela prije nego što budu predani investitoru na ugradnju iz same tvornice. Na primjeru ćemo prikazati kako se ovi postupci primjenjuju u stvarnom svijetu, koristeći jedan od podmorskih kabela 110 kV koji je izgrađen.

Kroz sve ove analize, osigurat ćemo dubok i sveobuhvatan uvid u svijet podmorskih kabela, istražujući njihovu tehničku, ekonomsku i praktičnu vrijednost te ističući njihovu ključnu ulogu u suvremenim komunikacijama i energetske sustavima.

## 2. KABELSKI ELEKTROENERGETSKI VODOVI 110 kV

### 2.1. Osnovne tehničke karakteristike kabela 110 kV

Tablica 2.1. *Električne karakteristike* [1]

Nazivni napon $U_0/U$	64/110 kV
Najviši napon mreže $U_m$	123 kV
Električna otpornost u skladu s	HRN HD 632
Specifična električna otpornost izolacije	1000 M $\Omega$ /km pri 90 °C
Strujna opterećenja [A] u skladu s	HRN HD 632

Tablica 2.2. Osnovne električne karakteristike bakrenog 110 kV kabela 2XS(F) i 2XS(FL)2Y [1]

Presjek vodiča i ekrana	Otpor vodiča		Otpor ekrana	Maksimalni iznos električnog polja	Kapacitet	Induktivitet trokut – linija razmak 2D	Maksimalna struja kratkog spoja		
	DC 20 °C	AC 90 °C	DC 20 °C				Vodič		Ekran
							65 °C	90 °C	
mm <sup>2</sup>	Ω/km	Ω/km	Ω/km	kV/mm	μF/km	mH/km	kA/1s	kA/1s	kA/1s
1x150/95	0,124	0,1586	0,193	6,4	0,11	0,50 - 0,68	23,5	21,5	15
1x185/95	0,0991	0,1272	0,193	6,5	0,12	0,48 - 0,67	29,0	26,5	15
1x240/95	0,0754	0,0972	0,193	6,5	0,14	0,47 - 0,65	37,6	34,3	15
1x300/95	0,0601	0,0780	0,193	6,5	0,15	0,44 - 0,62	47,0	42,9	15
1x400/95	0,0470	0,0618	0,193	6,3	0,17	0,42 - 0,61	62,7	57,2	15
1x500/95	0,0366	0,0492	0,193	6,1	0,18	0,40 - 0,58	78,4	71,5	15
1x630/95	0,0283	0,0393	0,193	5,9	0,2	0,39 - 0,57	98,7	90,1	15
1x800/95	0,0221	0,0323	0,193	5,7	0,22	0,38 - 0,56	125,0	114,5	15

Tablica 2.3. Osnovne električne karakteristike aluminijskog 110 kV kabela 2XS(F) i 2XS(FL)2Y

[1]

Presjek vodiča i ekrana	Otpor vodiča		Otpor ekrana	Maksimalni iznos električnog polja	Kapacitet	Induktivitet trokut – linija razmak 2D	Maksimalna struja kratkog spoja		
	DC 20 °C	AC 90 °C	DC 20 °C				Vodič		Ekran
							65 °C	90 °C	
mm <sup>2</sup>	Ω/km	Ω/km	Ω/km	kV/mm	μF/km	mH/km	kA/1s	kA/1s	kA/1s
1x150/95	0,206	0,2644	0,193	6,4	0,11	0,50 - 0,68	15,5	13,9	15
1x185/95	0,164	0,2105	0,193	6,5	0,12	0,48 - 0,67	19,2	17,1	15
1x240/95	0,125	0,1607	0,193	6,5	0,14	0,47 - 0,65	24,8	22,2	15
1x300/95	0,100	0,1289	0,193	6,5	0,15	0,44 - 0,62	31,1	27,8	15
1x400/95	0,0778	0,1010	0,193	6,3	0,17	0,42 - 0,61	41,4	37,0	15
1x500/95	0,0605	0,0794	0,193	6,1	0,18	0,40 - 0,58	51,8	46,2	15
1x630/95	0,0469	0,0624	0,193	5,9	0,20	0,39 - 0,57	65,2	58,3	15
1x800/95	0,0367	0,0501	0,193	5,7	0,21	0,38 - 0,56	82,8	75,0	15
1x1000/95	0,0291	0,0412	0,193	5,6	0,24	0,36 - 0,55	104,0	94,5	15
1x1200/95	0,0247	0,0362	0,193	5,4	0,26	0,35 - 0,54	124,0	113,0	15

Tablica 2.4. *Strujna opterećenja 110 kV kabela [1]*

Vrsta vodiča	Bakreni vodič								Aluminijski vodič							
	Zemlja				Zrak				Zemlja				zrak			
Mjesto polaganja	linija		trokut		linija		trokut		linija		trokut		linija		trokut	
Način polaganja	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓
Način uzemljenja	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓
Presjek vodiča	Strujno opterećenje															
mm <sup>2</sup>	A															
150	435	406	410	406	551	515	478	473	335	325	320	320	431	415	373	373
185	490	448	465	453	630	574	546	538	380	363	360	358	494	465	425	423
240	570	505	540	519	740	659	645	628	445	416	420	416	583	541	504	499
300	640	535	610	580	805	685	710	685	495	445	475	460	625	565	550	540
400	720	595	690	650	915	775	820	785	565	500	540	525	715	640	640	625
500	825	650	785	730	1060	860	945	895	645	555	620	595	835	725	745	720
630	940	705	890	810	1235	950	1085	1010	740	610	710	670	975	820	865	830
800	1055	755	1000	885	1415	1040	1235	1130	845	665	805	745	1130	910	995	940
1000									950	720	900	820	1295	1005	1135	1055
1200									1025	755	970	870	1420	1070	1235	

↓ - preplitanje uzemljenja

↓↓ - oba kraja uzemljena

Kada električna struja prolazi kroz kabel, on se zagrijava. Međutim, ako struja premaši nazivnu vrijednost, kabel se može pregrijati, što može dovesti do oštećenja i skraćanja njegovog vijeka trajanja. Zbog toga je ključno kontrolirati jačinu struje koja teče kroz kabel.

U tablici 2.3. su prikazane preporučene vrijednosti jakosti struje koje su sigurne za upotrebu s vodičima koji imaju maksimalnu temperaturu od 90°C. Ove preporuke uzimaju u obzir različite parametre kao što su temperatura zemlje, specifični otpor tla, temperatura zraka, dubina polaganja i razmak između kabela. Međutim, u stvarnoj primjeni ovi parametri mogu varirati od navedenih vrijednosti. Kako bi se uzeli u obzir ta odstupanja, koriste se korekcijski faktori.

Potrebno je istaknuti da preporučene strujna opterećenja navedena u tablici vrijede isključivo za specifične uvjete:

- Temperatura zemlje  $T = 20\text{ °C}$ ;
- Specifični otpor zemlje  $\theta = 1,0\text{ Km/W}$ ;
- Temperatura zraka  $T = 30\text{ °C}$ ;
- Dubina polaganja  $l = 1\text{ m}$ ;
- Razmak kabela  $a = 70\text{ mm} + D$  (vanjski promjer kabela).

Ako se u stvarnom okruženju razlikuju određeni parametri navedeni u tablici, koriste se korekcijski faktori. Ti korekcijski faktori se primjenjuju množenjem s prethodno navedenim strujnim opterećenjem iz tablice 2.3., kako bi se odredila stvarna dopuštena strujna opterećenja. Korekcijski faktori su detaljno prikazani u sljedećim tablicama.

Da bismo osigurali sigurnu i dugotrajnu upotrebu električnih kabela, ključno je pridržavati se preporučenih vrijednosti jakosti struje koje prolazi kroz kabel te uzeti u obzir specifične uvjete polaganja. To će omogućiti određivanje stvarno dozvoljenih strujnih opterećenja. Ako su uvjeti različiti od standardnih, treba primijeniti odgovarajuće korekcijske faktore kako bi se osigurala točna procjena dopuštenih struja.

Tablica 2.5. Korekcijski faktori za različite temperature okoline [1]

Temperatura okoline, °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Polaganje u zemlju	1,07	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76	0,71	0,65	0,60	0,53
Polaganje u zraku	1,15	1,12	1,05	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71	0,65	0,58



Tablica 2.6. Korekcijski faktori za različite dubine polaganja [1]

Dubina polaganja, m	0,50 - 0,70	0,71 - 0,90	0,91 - 1,10	1,11 - 1,30	1,31 - 1,50
Korekcijski faktor	1,05	1,02	1,00	0,97	0,95

Tablica 2.7. Korekcijski faktor za različite specifične toplinske otpornosti tla [1]

Specifični toplinski otpor tla	Km/W	0,70	1,00	1,20	1,50	2,00	2,50	3,00
Korekcijski faktori		1,10	1,00	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63

Tablica 2.8. Korekcijski faktori za različiti broj kabela ili sistema u istom prokopu [1]

Broj kabela (sistema)		2	3	4	5	6	8	10
Razmak između kabela (sistema) položenih u zemlji	Dodir	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
	7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
	15 cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,62

## 2.2. Vrste kablinskih vodova prema načinu polaganja

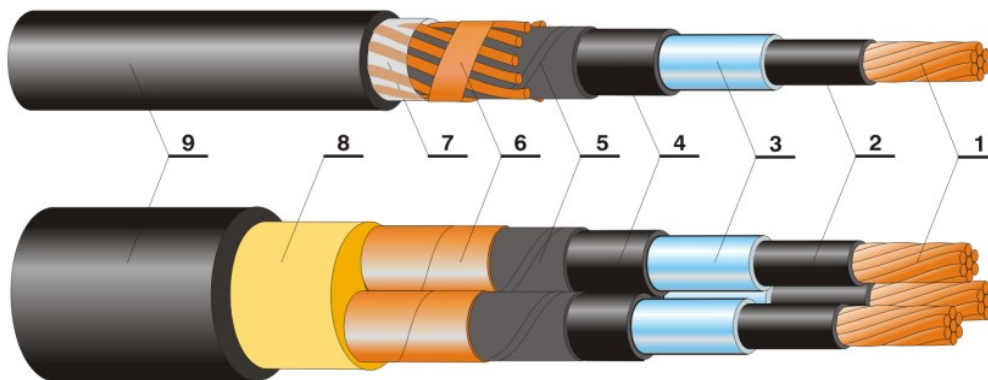
Električni kabele su neizostavan dio svakodnevnog života, omogućujući prijenos električne energije od izvora do potrošača. Sastoje se od vodiča, izolacije i vanjskog omotača. Vodiči su izrađeni od bakra ili aluminija, dok se za izolaciju najčešće koristi XLPE materijal. Vanjski omotač ima ulogu zaštite kabela od vanjskih utjecaja poput vlage, UV zračenja i mehaničkih oštećenja.

Tržište nudi različite vrste kabela, kao što su energetske kabele, telekomunikacijske kabele, optičke kabele i drugi. Svaka namjena zahtijeva specifične karakteristike kako bi se osigurala pouzdanost i sigurnost u različitim uvjetima. Ovisno o okolišu u kojem će se kabel koristiti, kabele se klasificiraju prema [2]:

- Podzemne kabele;
- Podmorske kabele;
- Zračne kabele.

Podzemni kabeli su često preferirani u urbanim i ruralnim područjima zbog svoje estetske vrijednosti i manje vidljivosti u usporedbi s nadzemnim vodovima. Dodatno, oni su manje izloženi nepovoljnim vremenskim uvjetima kao što su jaki vjetrovi i ledena kiša. Također, podzemni kabeli su manje osjetljivi na oštećenja koja mogu nastati padom grana stabala ili drugih vanjskih faktora.

Kabeli s dodatnom zaštitom namijenjeni su za primjenu u zahtjevnim uvjetima, kao što su područja s visokom vlagom, podzemni vodovi u urbanim područjima s povećanim mehaničkim opterećenjem ili područja s izazovnim terenom. Također, podzemni kabeli se često koriste kao spojni kabeli u industrijskim postrojenjima gdje je ključna sigurnost, pouzdanost i stabilnost napajanja. Na slici 2.1. je prikazan visokonaponski podzemni kabel, kako jednožilni tako i trožilni.



Slika 2.1. Visokonaponski podzemni jednožilni i trožilni kabel [1]

Opis konstrukcije:

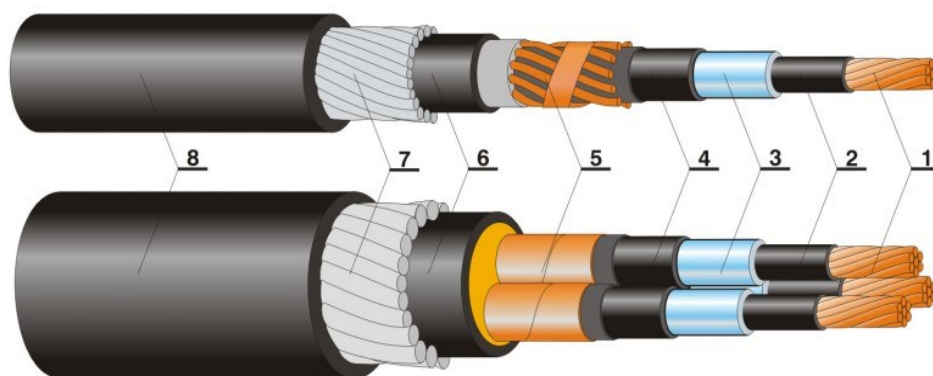
1. Vodič: bakreno ili aluminijsko uže;
2. Ekran vodiča: poluvodljivi sloj na vodiču;
3. Izolacija XLPE (umreženi polietilen);
4. Ekran izolacije: poluvodljivi sloj na izolaciji;
5. Separator: poluvodljiva vrpca;
6. Električna zaštita/ekran: od bakrene žice (jednožilni) ili bakrene trake (trožilni);
7. Separator: poliesterska vrpca;
8. Ispuna: PVC (polivinil-klorid);
9. Vanjski plašt: PVC.

Podmorski kabeli imaju posebno mjesto u energetsom prijenosu, omogućujući prijenos električne energije ispod vodenih površina poput oceana, mora, jezera ili rijeka. Njihova glavna svrha je

osigurati prijenos električne energije u podvodnim područjima i povezati kopnene dijelove s otocima. Visokonaponski podmorski kabeli igraju ključnu ulogu u različitim aspektima energetskega prijenosa. Oni su ključni za spajanje otoka s kopnom, osiguravajući siguran i pouzdan prijenos električne energije. Osim toga, imaju važnost u uspostavljanju međunarodnih energetskih mreža, omogućujući prijenos električne energije između različitih zemalja i kontinenata.

Podmorski kabeli visokog napona ključni su za uspješno ostvarivanje podvodnih energetskih projekata. Efikasno prenose energiju na velikim udaljenostima ispod vode. Posebno su dizajnirani kako bi bili otporni na vlagu i vodootporni, osiguravajući siguran i stabilan prijenos električne energije čak i u zahtjevnim vodenim uvjetima. Vanjski omotač podmorskog kabela štiti unutarnje vodiče i izolaciju od vode, mehaničkih oštećenja, morske soli i drugih vanjskih utjecaja.

Instalacija i održavanje podmorskih kabela zahtijevaju posebnu pažnju. Kabeli se polažu na dno vodenih tijela, koristeći kopnene metode polaganja ili specijalizirane brodove. Precizno postavljanje i osiguranje kabela tijekom instalacije ključni su kako bi se izbjegla oštećenja. Redovito održavanje i inspekcija podmorskih kabela također su od velike važnosti za očuvanje njihove dugotrajnosti i ispravnog funkcioniranja. Na slici 2.2. prikazan je visokonaponski podmorski kabel s jednim i tri vodiča.



Slika 2.2. Visokonaponski podmorski jednožilni i trožilni kabel [1]

Opis konstrukcije:

1. Vodič: bakreno užje
2. Ekran vodiča: poluvodljivi sloj na vodiču
3. Izolacija XLPE (umreženi polietilen)
4. Ekran izolacije: poluvodljivi sloj na izolaciji
5. Električna zaštita/ekran: od bakrene žice (jednožilni) ili bakrene trake (trožilni)

6. Unutarnji plašt: PE-HD (polietilen)
7. Armatura: od aluminijske žice ili čelične žice
8. Vanjski plašt: PE-HD (polietilen)

Nadzemni kabeli predstavljaju posebnu vrstu kabela koja se koristi za distribuciju električne energije iznad zemlje. Oni su osobito prikladni za otvorene prostore, uključujući šumske terene. Jedna od prednosti nadzemnih kabela je lakša instalacija u usporedbi s drugim tipovima kabela, budući da ne zahtijeva složene građevinske radove. Osim toga, postavljanje nadzemnih kabela rezultira manjim krčenjem šuma u odnosu na kabele koji se ne postavljaju izolirano.

Nadzemni kabeli su zaštićeni vanjskim omotačem koji ih štiti od vanjskih utjecaja, iako su istovremeno izloženi vremenskim uvjetima kao što su kiša, snijeg, led i vjetar. Njihova ekonomska isplativost dolazi do izražaja u nižim troškovima instalacije i održavanja u usporedbi s drugim vrstama kabela. Postavljanje ovih kabela ne zahtijeva izgradnju rovova ili drugih infrastrukturnih objekata, čime se smanjuju vremenski i financijski troškovi. Nadalje, nadzemni kabeli su praktičniji za popravke i održavanje jer su lako dostupni za inspekciju.

Važno je napomenuti da nadzemni kabeli imaju nekoliko izazova, posebno izloženost nepovoljnim vremenskim uvjetima. Budući da se postavljaju na otvorenom, podložni su kiši, snijegu, vjetru i drugim atmosferskim uvjetima. Također, mogu biti oštećeni padom grana ili drugih predmeta. Ovo može utjecati na njihovu dugotrajnost i zahtijevati redovno održavanje kako bi se osigurala ispravnost. Unatoč tim izazovima, nadzemni kabeli ostaju popularan izbor za distribuciju električne energije iznad zemlje zbog svoje ekonomske isplativosti i relativno jednostavne instalacije. Uz pravilno održavanje i praćenje vremenskih uvjeta, mogu osigurati pouzdanu distribuciju električne energije na širem području.

Polaganje energetskih kabela ima ključnu ulogu u formiranju efikasne mreže za distribuciju električne energije. Postoji niz različitih metoda za polaganje kabelskih vodova, a među njima su najčešće korištene tradicionalne tehnike, kao što su:

- Polaganje u cijevi;
- Izravno polaganje u rov;
- Polaganje u tunele;
- Polaganje kroz okna.

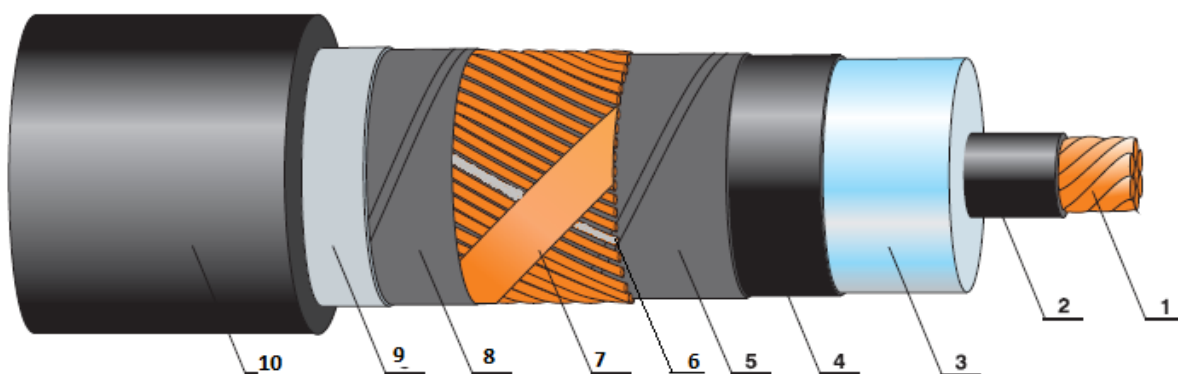
Međutim, s razvojem novih tehnologija, također su nastale inovativne metode polaganja kablinskih vodova, uključujući:

- Polaganje ispod mostova;
- Vertikalno polaganje;
- Horizontalno uvlačenje (u cijevi);
- Direktno ukopavanje (mikrotuneli);
- Strojno polaganje;
- Podvodno polaganje (rijeke, jezera, mora, ...)

Svaka tehnika nosi sa sobom svoje prednosti i nedostatke, no prioritet treba biti na zaštiti kabela od eventualnih oštećenja prilikom instalacije te održavanju sposobnosti odvodnje topline. Proračun prijenosne snage treba provesti za najnepovoljniji scenarij, a to je u slučaju polaganja u cijevi s horizontalnim položajem na maksimalnim dubinama.

### 2.3. Konstrukcijski zahtjevi na jednožilne koptene kabele

Izrada energetskog kabela ovisi o specifičnom mjestu polaganja i nazivnom naponu. Na primjeru prikazanom na slici 2.4., prikazan je presjek jednožilnog 110 kV kabela tipa 2XS(FL)2Y, koji je namijenjen za ugradnju u zemlju na područjima s iznimno visokom vlažnošću gdje nisu očekivana mehanička oštećenja i vlačna naprezanja.



Slika 2.3. presjek 2XS(FL)2Y kabela 110 kV [1]

Gdje je:

1. Vodič;
2. Zaslona vodiča;

3. Izolacija;
4. Zaslona izolacije;
5. Separator;
6. Čelična cjevčica za svjetlovodne niti (komunikacijska infrastruktura);
7. Metalni zaslon;
8. Separator;
9. Laminirani plašt;
10. Vanjski plašt.

Svaki element kabela je obrađen zasebno u sljedećim sekcijama.

### 2.3.1. Vodič

Glavna svrha vodiča u električnom sustavu je omogućiti optimalan prijenos električne struje uz minimalne gubitke. Pri dimenzioniranju vodiča, nužno je uzeti u obzir i električne i mehaničke aspekte. U kontekstu mehaničkog dimenzioniranja, ključno je postići željenu elastičnost vodiča i osigurati ravnomjeren profil. Također, promjer vodiča ima utjecaj na ukupnu težinu kabela, stoga se teži postizanju većeg faktora popunjenosti vodiča.

Kada su u pitanju električni zahtjevi, odabir prikladnog presjeka vodiča ima ključnu ulogu. Veći presjek vodiča omogućuje veću kapacitetu za prijenos električne snage, tj. sposobnost vođenja većih električnih struja. Zbog toga se posebno pažljivo bira presjek vodiča koji odgovara specifičnim potrebama električnog sustava, kako bi se osigurala pouzdanost i efikasnost prijenosa električne energije.

Vodiči u električnim sustavima izrađuju se od bakrenih ili aluminijskih žica koje su pletene u kompaktno užu prema standardu IEC 60228 - klasa 2. Oblik površine vodiča je cilindričan kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela električnog polja. Kada je riječ o odabiru materijala za vodiče, bakar se smatra boljim vodičem u usporedbi s aluminijem. Pri istom strujnom opterećenju i padu napona, presjek aluminijskog vodiča mora biti 1.6 puta veći od bakrenog kako bi se postigla slična učinkovitost. Prednost aluminijskog vodiča je njegova veća površina koja je izložena zraku, što rezultira smanjenim zagrijavanjem za 18% u odnosu na bakreni vodič [2].

Aluminij je lakši materijal od bakra, što rezultira manjom ukupnom masom kabela. Osim toga, cijena aluminija je otprilike 50% niža od cijene bakra. Stoga, prilikom odabira vodiča, često se

uzima u obzir niža cijena aluminijskog materijala, posebno pri izgradnji novih kabelskih mreža, kako bi se smanjili početni troškovi.

Kabeli s bakrenim vodičima imaju manju presjek u usporedbi s kabelima s aluminijskim vodičima za istu vodljivost. To znači da kabel s bakrenim vodičem može biti dulji u odnosu na kabel s aluminijskim vodičem kada su smješteni na bubnjevima istih dimenzija. „To je posebno značajno kod podmorskih kabela jer se s kabelima izrađenim s vodičima od bakra u tom slučaju koristi manji broj spojnica za istu duljinu kabelske trase“[3]. Kada se koriste kabeli s bakrenim vodičima, postoji manja potreba za spajanjem pojedinačnih vodiča kako bi se postigla željena duljina kabela. To smanjuje broj spojnica koje se koriste na trasi podmorskog kabela, što može poboljšati pouzdanost i smanjiti rizik od kvarova.

Kabeli s aluminijskim vodičima su manje fleksibilni u usporedbi s kabelima s bakrenim vodičima. Kabeli s bakrenim vodičima manje su osjetljivi na probleme pri spajanju, što pruža veću pouzdanost veza. Također, njihova instalacija je olakšana zahvaljujući većoj fleksibilnosti, jer je krutost kabela povezana s kvadratom presjeka vodiča, odnosno četvrtinom promjera kabela, „krutost kabela ovisi o kvadratu presjeka vodiča a time i o četvrtini promjera kabela“[3]. Kada se koriste kabeli s bakrenim vodičima, njihova fleksibilnost olakšava proces spajanja jer se mogu lakše prilagoditi različitim uvjetima i zahtjevima. To smanjuje rizik od oštećenja vodiča tijekom instalacije i osigurava bolju kvalitetu veza. Dodatno, zbog svoje savitljivosti, kabeli s bakrenim vodičima omogućuju lakšu instalaciju. Manja krutost kabela olakšava rukovanje i postavljanje, posebno u situacijama s ograničenim prostorom ili zahtjevnim rutama polaganja.

U tablici 2.8. su navedene karakteristike bakra i aluminijska kako bi se omogućila usporedba.

Tablica 2.9. Usporedba značajki bakra i aluminija [3]

Značajka materijala	Bakar (Cu)*	Aluminij (Al)
<b>Fizikalna svojstva</b>	-	-
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	8930	2700
Temperatura tališta [°C]	1084,62	660,32
Linearni termički koeficijent istezanja	1,7x10 <sup>-5</sup>	2,3x10 <sup>-5</sup>
<b>Mehanička svojstva</b>	-	-
Modul elastičnosti [GPa]	125	69
Tvrdoća [MPa]	369	167
Prekidna čvrstoća [MPa]	200-280	127-206
<b>Električna svojstva</b>	-	-
Specifična električna otpornost na 20 °C [Ωm]	1,7241x10 <sup>-8</sup>	2,8264x10 <sup>-8</sup>
Specifična električna vodljivost na 20 °C [S/m]	5,8x10 <sup>-7</sup>	3,77x10 <sup>-7</sup>
Električna vodljivost (IACS)* [%]	100	61

\*U tablici 2.8. su dane karakteristike žarenog bakra i aluminija radi usporedbe, pri čemu se vrijednosti za žareni bakar temelje na Internacionalnim standardima za žareni bakar (International Annealed Copper Standard - IACS).

Povećanje presjeka vodiča rezultira povećanjem razlike između izmjeničnog i istosmjernog otpora vodiča. Ovo je posljedica dva značajna fenomena: skin efekta i efekta blizine. Ta pojava proizlazi iz pomaka struje prema površini vodiča.

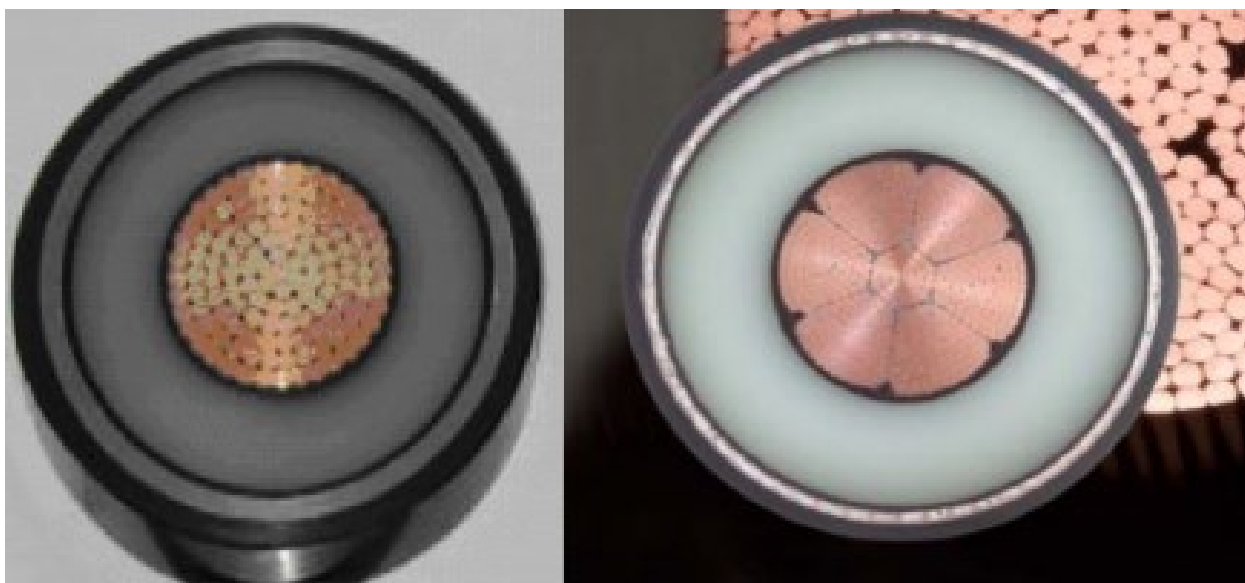
Skin efekt je posljedica prolaska visokofrekventne struje kroz vodič. Na visokim frekvencijama, struja se preferencijalno koncentrira bliže površini vodiča, dok se unutarnji slojevi manje koriste za provođenje struje. Kao rezultat toga, efektivni presjek za provođenje struje smanjuje se s porastom frekvencije. Ovo povećava izmjenični otpor u odnosu na istosmjerni otpor vodiča.

Kod susjednih vodiča se generira neravnomjerna raspodjela gustoće struje koja se naziva efekt blizine što predstavlja elektromagnetski fenomen. Kada izmjenična struja prolazi kroz vodič,



unutar njega se generiraju vrtložne struje zbog elektromagnetskog polja susjednih vodiča. Ove inducirane struje "usmjeravaju" glavnu struju prema jednom kraju vodiča. Ako susjedni vodiči provode struju u istom smjeru, elektromagnetske linije snage se presijecaju s vodičima na način da je gustoća struje veća na udaljenim krajevima vodiča. Nasuprot tome, kada susjedni vodiči provode struju u suprotnim smjerovima, gustoća struje je veća na bližim dijelovima tih vodiča. Kao rezultat, efekt blizine izaziva nejednaku raspodjelu gustoće struje u susjednim vodičima, s obzirom na smjer i udaljenost.

Radi ublažavanja skin efekta i efekta blizine, preporučuje se korištenje višežičanih zbijenih okruglih vodiča klase 2 za presjeke do 1000 mm<sup>2</sup> za bakar i 1200 mm<sup>2</sup> za aluminij. Kada su u pitanju presjeci veći od ovih vrijednosti, preporučuje se primjena vodiča sa sektorskim presjekom, poznatih kao Milikenovi vodiči. Milikenovi vodiči sastoje se od nekoliko sektora vodiča koji zajedno tvore cjelokupni presjek u obliku cilindra. Ovi sektori su međusobno izolirani i sastavljeni od lakiranih žica. Ova specifična struktura omogućuje bolju ravnotežu struje unutar vodiča, čime se umanjuju efekti skin efekta i efekta blizine. Također, ta struktura omogućuje upotrebu većih presjeka bez značajnog povećanja električnog otpora.



Slika 2.4. Okrugli zbijeni vodič (lijevo) i Milikenov vodič (desno) [3]

### 2.3.2. Zaslون vodiča

Zaslون vodiča predstavlja unutarnji sloj poluvodičkog materijala koji se koristi u konstrukciji vodiča. Ovaj sloj izrađuje se od mrežastog poluvodičkog polietilena, koji se dobiva dodavanjem ugljika u polietilen. Proizvodnja ovog sloja uključuje trostruko istovremeno ekstrudiranje, što

znači da se slojevi zaslona vodiča, glavne izolacije i vanjskog zaslona nanose istovremeno. Ovaj proces osigurava minimalno onečišćenje i kontaminaciju na spojevima između slojeva kabela. Bitno je da ekstrudirani sloj bude konstantan, bez neravnina te da savršeno prijanja uz vodič i izolaciju. Nominalna debljina ovog sloja iznosi 1.5 mm, s minimalnom dozvoljenom debljinom na svakoj točki koja ne smije biti manja od 1.2 mm, kako bi se očuvala kvaliteta i funkcionalnost zaslona vodiča.

Poluvodički sloj ima nekoliko ključnih funkcija unutar kabela. Prije svega, smanjuje hrapavost površine vodiča te sprječava formiranje zračnih šupljina, što omogućuje ravnomjeran protok električnog polja kroz kabel. Na taj način se sprječavaju visoke vrijednosti jakosti električnog polja (izražene u kV/mm) na spoju između vodiča i izolacije, čime se minimizira rizik od električnog probijanja. Također, poluvodički sloj djeluje kao toplinska izolacija u slučaju kratkog spoja, smanjujući temperaturu na tom području. Ova karakteristika doprinosi produljenju životnog vijeka kabela.

Vodljivost poluvodičkog sloja je podložna različitim faktorima kao što su udio ugljika, disperzija, temperatura i trajanje sintetskog procesa. Važno je naglasiti da "Električna otpornost zaslona vodiča ne smije prelaziti 5000  $\Omega\text{cm}$  pri 20°C i 25000  $\Omega\text{cm}$  pri nazivnoj temperaturi" [4]. Ove navedene vrijednosti osiguravaju odgovarajuću vodljivost i funkcionalnost poluvodičkog sloja unutar kabela.

### 2.3.3. Izolacija

Unutar kabela, izolacija ima iznimno važnu ulogu u očuvanju izolacije vodiča od električnog zaslona koji često ima uzemljeni potencijal, posebno kada je kabel pod visokim naponom. Ključni zahtjev za izolacijom jest njezina sposobnost da kontinuirano podnosi nazivne napone i da se nosi s povećanim prolaznim vrijednostima električnog polja.

Prema standardu IEC 60840, različiti materijali se koriste za izolaciju u kabelima, uključujući polietilen (PE), polietilen visoke gustoće (HDPE), umreženi polietilen (XLPE) i etilen-propilensku gumu (EPR). No, najčešće se primjenjuje umreženi polietilen (XLPE) zbog svoje visoke dielektrične i toplinske stabilnosti. Proces izrade XLPE izolacije obično uključuje trostruko istovremeno ekstrudiranje pod visokim tlakom i temperaturom. Ovaj proces osigurava čvrsto povezivanje molekula i stvaranje homogene strukture izolacije. Tehnički rečeno, rezultira visokom toplinskom stabilnošću, otpornošću na kidanje, otpornošću na djelomična pražnjenja i niskim

vrijednostima dielektričnih gubitaka. Također, izolacija mora biti otporna na prodor vlage kako bi zadržala svoje električne karakteristike i performanse, posebno u vlažnim uvjetima okoline.

XPLE izolacija je sposobna da kontinuirano podnese temperaturu do 90 °C, što je najviša dozvoljena temperatura za trajno opterećenje u usporedbi s drugim polimernim materijalima. „Također, tijekom izvanrednih okolnosti, može se dozvoliti opterećenje od 105 °C ne više od 72 sata prosječno tijekom godine. Uzimajući u obzir standardno očekivanje životnog vijeka kabela od 40 godina, to znači da bi kabel u tom periodu morao moći izdržati 2880 sati rada u preopterećenju do 105 °C“ [4] Nadalje, izolacija mora moći izdržati izloženost temperaturi od 250 °C najmanje 0.5 sekundi u slučaju kratkog spoja.

Tablica 2.10. *Specifikacija XLPE i EPR izolacije* [3]

<b>Fizikalna svojstva</b>	<b>XLPE</b>	<b>EPR</b>
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	920	1200-1400
Vlačna čvrstoća [MPa]	19	9-12
Produženje [%]	500	250-350
Modul elastičnosti [MPa]	121	5-14
Toplinska vodljivost [W/mK]	0.27	0.27-0.35
Maksimalna trajna radna temperatura [°C]	90	85
Volumni otpor na 20°C	10 <sup>15</sup>	10 <sup>13</sup>
Tangenta kuta dielektričnih gubitaka, tan δ	4x10 <sup>-4</sup>	4x10 <sup>-3</sup>

„Minimalna debljina izolacije izmjerena u bilo kojoj točki ne smije biti manja od 90% nominalne debljine“ [5]. U slučaju naponskih razina iznad 30 kV, preporučuje se određena debljina izolacije, a proizvođač ima mogućnost odabira nominalne debljine na temelju ispitivanja i operativnog iskustva. „Dielektrična čvrstoća novog izoliranog XPLE kabela je oko 60 kV/mm“ [2]. Kao rezultat toga, debljina izolacije za Cu 630 mm<sup>2</sup> i Al 800 mm<sup>2</sup> kabele smanjena je s 18 mm na 16 mm, pa čak i na 15 mm. Postoje različiti razlozi za smanjenje debljine izolacije, a jedni od najčešćih su: dobivanje kvalitete izolacije koja dopušta veće vrijednosti jakosti električnog polja, poboljšanu proizvodnju poluvodičkih slojeva i postizanje veće točnosti dimenzija.

#### 2.3.4. Zaslona izolacije

Zaslona izolacije se proizvodi od istog materijala kao i zaslona vodiča. Taj zaslona se nanosi na izolaciju istovremeno s zaslonom vodiča i izolacijom kroz postupak trostrukog istovremenog ekstrudiranja. Zahtjevi za zaslona izolacije su jednaki kao i za zaslona vodiča. Ključno je da zaslona izolacije mora biti neprekidno nanijet, s konstantnom srednjom debljinom, te da se savršeno prijanja uz izolaciju. Glavni cilj zaslona izolacije je pružiti dosljednu zaštitu izolaciji kabela. Kvalitetna zaštita i optimalne performanse kabela postižu se kroz pažljiv proces ekstrudiranja koji omogućuje pravilno nanošenje zaslona izolacije te osigurava čvrsto prijanjanje uz izolaciju. „Minimalna debljina za 110 kV kabele je 0.8mm“ [4].

Uloga zaslona izolacije je stvaranje postupnog prijelaza električnog polja od električnog metalnog zaslona, gdje je vrijednost električnog polja nula (0). Progresivni prijelaz električnog polja omogućava postupno smanjenje jakosti električnog polja od vodiča prema zaslona izolacije. Ova funkcija je bitna kako bi se spriječile visoke vrijednosti električnog polja koje mogu prouzročiti elektromagnetske smetnje, gubitke energije i druge nepoželjne efekte. Zaslona izolacije djeluje kao prijelazna zona koja omogućuje ravnomjernu raspodjelu električnog polja i postizanje stabilne i uravnotežene distribucije polja. „Specifična otpornost nanesenog zaslona izolacije ne smije biti veća od 500  $\Omega\text{m}$ “ [5]

#### 2.3.5. Separator: uzdužna vodena zaštita

Separator je izrađen od bubrivih poluvodičkih traka koje se nanose preko zaslona izolacije i metalnog zaslona. Glavna svrha separacije je spriječiti prodor vlage u uzdužnom smjeru unutar kabela. Bubrivne trake imaju sposobnost apsorpiranja većih količina vode te, kad dođu u kontakt s vlagom, bubrenjem zaustavljaju daljnji ulaz vlage u unutrašnjost kabela. Također, traka smještena ispod metalnog zaslona ima značajnu ulogu kao mehanička zaštita zaslona izolacije i same izolacije od eventualnih udubljenja uzrokovanih zaslonskim žicama.

Pri odabiru i izradi trake separatora, važno je osigurati da ima kompatibilnu radnu temperaturu s izolacijom kako bi očuvala svoje funkcionalne karakteristike i integritet u svim radnim uvjetima kabela. Osim toga, traka mora biti dovoljno čvrsta i izdržljiva kako bi mogla podnijeti „stresove“ koji se pojavljuju pri eventualnom nastanku kratkog spoja.

Dizajniranje i proizvodnja trake separatora moraju se pridržavati strogih standarda propisanih u IEC 60840, kako bi se osigurala visoka kvaliteta, sigurnost i pouzdanost kabela. Kabel koji je opremljen uzdužnom vodenom zaštitom označava se dodavanjem slova "F" u oznaku kabela, kao što je prikazano u značajci "(F)". Ovo označavanje ukazuje na prisutnost važnog elementa zaštite koji sprječava prodor vlage.

#### 2.3.6. Metalni zaslon

Metalni zaslon u jednožilnim kabelima na 110 kV ima ključnu ulogu u osiguravanju sigurnog i pouzdanog rada elektroenergetskog sustava. Glavna svrha metalnog zaslona je postizanje simetrične raspodjele električnog polja unutar kabela i neutralizacija vanjskog električnog polja koje može biti prisutno. Osim toga, metalni zaslon služi za pražnjenje kapacitivne struje kroz izolaciju, čime se štiti kabel od negativnih utjecaja vanjskog magnetskog polja koje može biti inducirano od strane susjednih kabela.

Metalni zaslon uobičajeno je izrađen od bakrenih žica koje su namotane oko kabela u skladu s njegovim obodom. Također, kontraspirala od bakrene trake koristi se kao dopunska zaštita, obuhvaćajući sam kabel. Važno je da su žice u zaslonu jednoliko raspoređene po cijelom obodu kabela kako bi se osigurala ravnomjerna zaštita. Standard IEC 60840 utvrđuje specifične zahtjeve za metalni zaslon i njegovu izradu. „Prosječni razmak između zasebnih žica ne smije biti veći od 4 mm. Razmak između dvije susjedne žice ni u jednom mjestu ne smije biti veći od 8 mm“ [6].

Kontraspiralna traka, koja je sastavni dio metalnog zaslona, ima ključnu ulogu u osiguravanju ravnomjernog raspodjele struje kvara kroz žice zaslona, čime se postiže brzo i uravnoteženo opterećenje cijelog metalnog zaslona. Pravilno dimenzioniranje kontraspiralne trake je od suštinskog značaja kako bi se osiguralo da ne dođe do prekomjernog zagrijavanja pri kratkom spoju. Ovo dimenzioniranje mora biti pažljivo provedeno kako bi se osigurala optimalna toplinska otpornost trake i osigurala njena funkcionalnost u različitim uvjetima rada.

U praksi se za kabele s radnim naponom od 110 kV često primjenjuje standardizirani presjek od 95 mm<sup>2</sup> za metalni zaslon. Ova vrijednost presjeka se pokazala kao adekvatna za postizanje potrebnih karakteristika i performansi kabela u praksi.

Pravilno uzemljenje metalnog zaslona ima iznimno važnu ulogu u osiguranju sigurnosti, zaštiti od prenapona te održavanju stabilnosti električnog sustava. Uzemljenje se provodi na dva načina: s

jedne strane putem odvodnika prenapona, dok se s druge strane direktno uzemljuje metalni zaslon. Ova mjera osigurava da se neželjeni električni naboji sigurno odvede i sprječavaju potencijalni prenaponi, čime se doprinosi ukupnoj pouzdanosti i funkcionalnosti sustava.

### 2.3.7. Čelična cjevčica za svjetlosne niti

Osim žica koje čine metalni zaslon, također je moguće uključiti čeličnu cjevčicu s optičkim vlaknima, ako je to potrebno. Dodavanje ove dodatne komponente može imati višestruku svrhu, uključujući prijenos informacija ili mjerenje temperature samog kabela. Ova dopunska komponenta pruža dodatne mogućnosti za unaprjeđenje funkcionalnosti i nadzora kabela, što može biti posebno važno u specifičnim situacijama.

Korištenjem optičkih vlakana unutar metalnog zaslona kabela omogućuje se prijenos signala ili podataka. Ova tehnologija omogućuje brz i pouzdan prijenos informacija kroz kabelski sustav. Osim toga, optička vlakna omogućuju komunikaciju između različitih dijelova mreže, čime se proširuje funkcionalnost kabela. To omogućuje napredne komunikacijske mogućnosti i unaprjeđuje ukupnu učinkovitost i fleksibilnost sustava.

Uz prisutnost svjetlosnih vlakana, čelična cjevčica također omogućuje smještaj termalnih senzora. Ti senzori služe za precizno mjerenje temperature kabela. Ova dodatna komponenta omogućuje stalno praćenje temperature kabela te rano otkrivanje potencijalnih problema ili pregrijavanja (preopterećenja). Time se poboljšava sigurnost i pouzdanost sustava, omogućujući pravovremene intervencije kako bi se spriječila ozbiljna oštećenja ili kvarovi.

Integracija čeličnih cjevčica s optičkim vlaknima u žice metalnog zaslona donosi dodatnu funkcionalnost i omogućava nadzor nad kabelom. Ova dodatna komponenta poboljšava performanse, pouzdanost i sigurnost 110 kV kabela, omogućujući napredne mogućnosti prijenosa informacija i precizno praćenje temperature.

### 2.3.8. Laminirani plašt: poprečna vodena zaštita

U slučaju kada se kabel polaže u vrlo vlažna okruženja, moguće je koristiti poprečnu vodenu zaštitu koja je inkorporirana unutar samog kabela. Ovaj tip zaštite često se izrađuje od aluminijske folije koja se postavlja ispod vanjskog plašta kabela. Za razliku od standarda koji se primjenjuju na kabele niskog i srednjeg napona (NN i SN), debljina folije za poprečnu vodenu zaštitu obično

nije precizno definirana, već se određuje na temelju iskustva u praksi. Jedan izvor navodi: „Minimalna debljina folije mora biti 0.1 mm“ [5].

Prilikom polaganja kabela u morsko okruženje, umjesto aluminijske folije koristi se olovni plašt, jer je olovo otpornije na koroziju koja je uobičajena u takvim uvjetima. Kabel opremljen i uzdužnom i poprečnom vodenom zaštitom označava se oznakom "FL" u zagradi, što označava prisutnost ovih dodatnih slojeva zaštite.

Ugradnja poprečne vodene zaštite unutar kabela pruža dodatnu sigurnost protiv infiltracije vlage iz okoline, što značajno povećava pouzdanost i dugotrajnost kabela. Ovo je posebno korisno u uvjetima visoke vlažnosti ili prisutnosti morske vode. Ova dodatna zaštita doprinosi očuvanju električnih karakteristika kabela te smanjuje rizik od oštećenja uzrokovano prodorom vlage.

#### 2.3.9. Vanjski plašt

Vanjski omotač kabela ima ključnu ulogu u pružanju sveobuhvatne zaštite kabele. Njegova osnovna funkcija je osigurati mehaničku zaštitu od abrazije, zarezivanja, udaraca i drugih potencijalnih vanjskih oštećenja. Pored toga, vanjski omotač mora biti otporan na hemijske supstance koje se mogu nalaziti u zemlji i izloženost UV zračenju. Također, njegov zadatak je ograničiti prodor vlage u kabel kako bi se smanjio rizik od korozije.

Najčešće korišten materijal za izradu vanjskog omotača je polietilen visoke gustoće (HDPE), iako se u rijetkim slučajevima koristi i polivinil klorid (PVC). HDPE je preferirani materijal zbog svojih izvanrednih mehaničkih i fizičkih karakteristika, kao što su visoka čvrstoća, otpornost na vlagu i širok raspon radnih temperatura. Osim toga, HDPE je lakši od drugih materijala i ima dug životni vijek kabela. U vanjski omotač se mogu dodati razni aditivi kako bi se postigla svojstva poput otpornosti na plamen i smanjenje dima, posebno ako se koriste bezhalogenski materijali.

Standard IEC 60840 propisuje minimalnu debljinu vanjskog omotača, no proizvođačima se pruža fleksibilnost da koriste deblji omotač prema vlastitom iskustvu i praksi. „Minimalna debljina vanjskog plašta ni u jednoj točki kabela ne smije biti manja od 85 % nominalne debljine minus 0.1 mm“ [5].

U situacijama gdje se predviđaju veća mehanička opterećenja na kabelu, vanjskom omotaču se može dodati dodatna armatura s ciljem poboljšanja mehaničkih karakteristika. Ova armatura može biti u obliku čeličnog pletiva ili aluminijskih traka, čime se pruža dodatna čvrstoća i zaštita kabelu.

Na površinu vanjskog omotača kabela može se nanijeti tanki sloj poluvodičkog materijala debljine 0.2 mm. Ovaj sloj ima ulogu vanjske elektrode koja se koristi za izvođenje električnih ispitivanja kabela tijekom njegove proizvodnje, postavljanja ili tokom radnog vijeka. Postavljanjem ovog sloja omogućuje se provođenje različitih električnih testova koji služe za procjenu električnih svojstava kabela i osiguravanje njegove sigurnosti. Vanjska elektroda od poluvodičkog materijala omogućuje izvođenje testova kao što su ispitivanje izolacije, mjerenje otpora, testiranje kontinuiteta i drugih ispitivanja važnih za vrednovanje kvalitete i pouzdanosti kabela. Pravilno izvođenje električnih ispitivanja pomaže u identifikaciji potencijalnih problema ili nedostataka u kabelu te omogućuje primjenu odgovarajućih mjera održavanja ili popravka.



### **3. PODMORSKI KABELSKI VODOVI**

Podmorski kabeli predstavljaju posebnu kategoriju kabela koja ima ključnu ulogu u uspostavljanju veza između otoka i kontinentalnog dijela elektroenergetske mreže. Njihova instalacija igra presudnu ulogu u osiguravanju sigurne i pouzdane opskrbe električnom energijom za stanovnike otoka. Važno je istaknuti da razvoj podmorske kabelaške infrastrukture zahtijeva blisku suradnju s pomorskim vlastima i primjenu ekološki održivih metoda.

Izrada podmorskih kabela zahtijeva specifične komponente, uključujući snažnu armaturu i obvezni olovni omotač koji pruža iznimnu zaštitu od vlage te osigurava optimalno funkcioniranje vodiča na morskom dnu. Uloga armature kod podmorskih kabela izuzetno je važna i obuhvaća dvije ključne funkcije. Tijekom postavljanja kabela, armatura apsorbira vlačne sile koje proizlaze iz razlike u visini. Nakon polaganja, armatura djeluje kao zaštita kabela od mehaničkih oštećenja.

U situacijama koje zahtijevaju dodatnu zaštitu, moguće je koristiti dvostruku armaturu sa čeličnim žicama namotanim u suprotnim smjerovima. Ovakva konfiguracija koristi se na područjima gdje postoji rizik od oštećenja uslijed sidrenja ili ribolova. Dodatna zaštita od korozije često se postiže primjenom materijala poput jute ili sličnih opcija.

Istaknuto je kako su snažna armatura i obavezan olovni omotač neophodni za podmorske kabele, osiguravajući izvanrednu zaštitu od vlage i mehaničkih oštećenja. Ovo osigurava stabilno funkcioniranje kabela na morskom dnu te pouzdanu opskrbu električnom energijom otoka. Razvoj podmorskih kabelaških mreža označava ključni korak u postizanju energetske neovisnosti otoka i poticanju njihova napretka.

#### **3.1. Vrste podmorskih kabela**

Podmorski kabeli razvrstavaju se prema broju vodiča odnosno žila unutar kabela. Klasifikacija uključuje jednožilne i trožilne kabele. Jednožilni kabeli imaju jedan vodič, dok trožilni kabeli sadrže tri vodiča u jednoj konstrukciji. Ova kategorizacija odnosi se na samu konstrukciju kabela te utječe na njegove električne karakteristike i performanse.

Jednožilni podmorski kabeli često su opremljeni brončanom armaturom koja ima važnu ulogu u smanjenju smetnji kao što su vrtložne struje i gubici prijenosa. Ova armatura pruža elektromagnetsku zaštitu, podržavajući stabilnost i kvalitetu prijenosa električne energije kroz

kabel. Ovaj tip kabela prikladan je za prijenos pri visokim naponima na velike udaljenosti i za povezivanje otoka s kopnom.

S druge strane, trožilni podmorski kabeli koriste pocinčani čelik kao armaturu. Ova armatura osigurava dodatnu čvrstoću i fleksibilnost kabele. Trožilni kabeli često se primjenjuju kada je potrebno prenositi veće snage ili kada su rezerve i pouzdanost važne u elektroenergetskom sustavu.

Podmorski kabeli mogu se dodatno klasificirati prema naponskoj razini koju podržavaju. Postoje dvije glavne kategorije: srednjenaponski i visokonaponski podmorski kabeli. Svaka od ovih kategorija koristi se za specifične potrebe te posjeduje karakteristike prilagođene svojoj namjeni.

Srednjenaponski podmorski kabeli su konstruirani za prijenos električne energije na naponskim razinama od 10, 20 i 35 kV. Impregnirani papir često se koristi za izolaciju ovih kabela, čime se postiže sličan izgled kao kod masenih kabela. Bitno je napomenuti da je impregnirani papir proizveden tehnikom "non-drain", što sprječava strujanje unutar kabela tijekom postavljanja. Osim impregniranog papira, za izolaciju se mogu upotrebljavati i drugi materijali poput umreženog i neumreženog polietilena, EPR (etilen-propilen rubber) ili kaolina.

Visokonaponski podmorski kabeli koriste se za transport električne energije na visokim naponskim razinama, obično od 110 kV i više. Ova kategorija kabela često je realizirana kao uljni kabel. Unutar konstrukcije kabela smješteno je nisko viskozno ulje koje struji kroz središnji kanal šupljeg vodiča kod jednožilnih kabela ili između segmenata između žila kod trožilnih kabela. Za osiguranje pravilnog funkcioniranja uljnih kabela ključna je protutlačna bandaža.

Tokom rada podmorskog kabela, temperatura unutar kabela varira ovisno o opterećenju električne energije koja se prenosi. Ovaj porast temperature može prouzročiti hidrodinamičke promjene u ulju koje se koristi kao izolacija za vodiče unutar kabela. Kako temperatura raste, ulje se širi i povećava svoj volumen. Da bi se adekvatno upravljalo ovim promjenama u volumenu ulja, postavljaju se uljne posude na krajevima podmorskog kabela.

Ove posude su namijenjene za pohranu viška ulja koji se generira uslijed porasta temperature. Uobičajeno, uljne posude su postavljene pod niskim tlakom kako bi omogućile skladištenje viška ulja bez povećanja unutarnjeg tlaka kabela. Također, na krajevima kabela mogu se nalaziti i uljne posude s povišenim tlakom. Te posude imaju ulogu nadopunjavanja normalnih gubitaka ulja tijekom rada kabela.

Kada je potrebno, uljne posude s povišenim tlakom dodaju dodatno ulje kako bi se održao optimalan nivo ulja unutar kabela i osigurala njegova pravilna funkcionalnost. Upotreba uljnih posuda na krajevima podmorskog kabela omogućuje održavanje stabilnog i sigurnog rada kabela, smanjuje rizik od oštećenja te osigurava pouzdan prijenos električne energije.

Pravilno praćenje i održavanje ulja unutar kabela ključno je za osiguranje dugotrajnosti i optimalnih performansi. Redovito praćenje razine ulja i provjera tlaka u uljnim posudama su ključni čimbenici za osiguranje pravilnog funkcioniranja podmorskog kabela.

Postoji još jedna podjela podmorskih kabela koja se temelji na vrsti električnog napona koji se prenosi: istosmjerni (DC) ili izmjenični (AC) kabeli. Istosmjerni podmorski kabeli konstruirani su s vanjskim metalnim slojevima od magnetskih materijala kako bi se spriječile vrtložne struje. Bitno je istaknuti da su istosmjerni podmorski kabeli uvijek jednožilni, koristeći samo jedan vodič za prijenos električne energije. Ova jednožilna konstrukcija omogućuje optimizirane električne performanse i pouzdanost prijenosa istosmjernog napona kroz podmorski kabel.

Istosmjerni podmorski kabeli značajno pridonose prijenosu visokih snaga na velikim udaljenostima te omogućuju povezivanje različitih električnih sustava. Njihova konstrukcija koja uključuje magnetske materijale i jednožilnu izvedbu osigurava stabilan i efikasan prijenos istosmjernog napona ispod vode.

Suprotno, izmjenični podmorski kabeli primarno služe za prijenos električne energije u obliku izmjeničnog napona. Ovi kabeli često sadrže više vodiča za prijenos struje te se često upotrebljavaju za prijenos električne energije između obalnih postrojenja i kopnenih elektroenergetskih mreža.

Prilikom odabira podmorskih kabela između navedenih podjela, broja vodiča, naponske razine i vrste napona, nužno je uzeti u obzir specifične zahtjeve projekta. Faktori poput prijenosne snage, udaljenosti, uvjeta okoline i ekonomske održivosti imaju ključnu ulogu u optimalnom izboru kabela. Glavni cilj je osigurati pouzdanu i sigurnu opskrbu električnom energijom kroz podvodna područja. Dakle, pravilan odabir odgovarajućeg tipa kabela presudan je za postizanje stabilnog i efikasnog prijenosa električne energije ispod vode. Stoga je nužno provesti temeljitu analizu, uzimajući u obzir tehničke, ekonomske i ekološke čimbenike, kako bi se odabrao kabel koji najbolje odgovara zahtjevima i osigurao pouzdan i siguran prijenos električne energije pod vodom.

### 3.2. Usporedba i odnos HVAC i HVDC kabelskog prijenosa

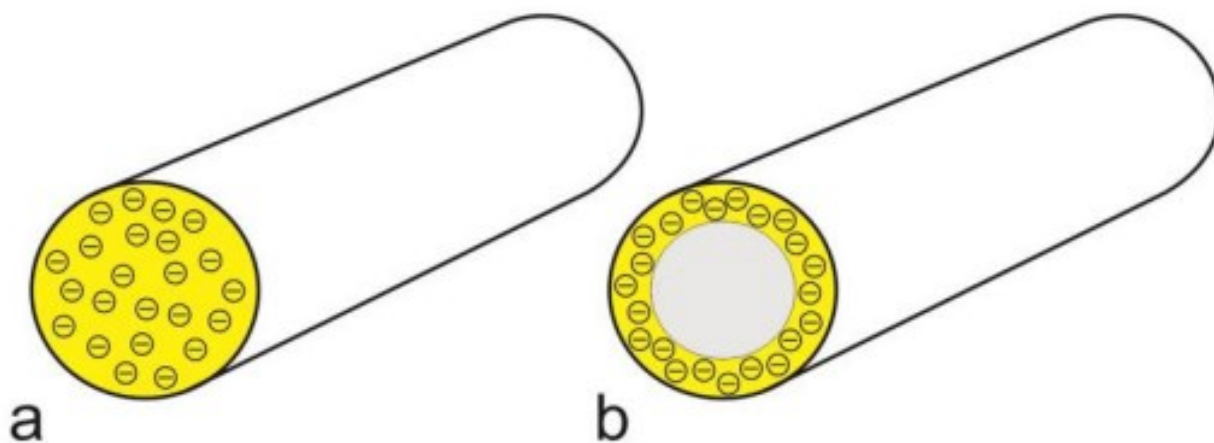
Prijenos velike količine električne energije na znatne udaljenosti za osiguravanje stabilne i pouzdane opskrbe električnom energijom ostvaruje se putem dva glavna tipa sustava: izmjenična struja visokog napona (HVAC) i istosmjerna struja visokog napona (HVDC) [7]. Oba ova načina prijenosa koriste visoke naponske razine kako bi se postigla efikasan prijenos električne energije.

Dva ranga visokih napona koja se koriste su ekstra visoki napon (EHV) i ultravisoki napon (UVH), obuhvaćajući spektar napona od 35 kV pa sve do 800 kV, te čak i više, što se može očekivati u bližoj budućnosti [7]. Ovi visoki naponi omogućuju postizanje cilja dugog i efikasnog prijenosa energije na velike udaljenosti.

Izuzetna prednost korištenja visokih napona proizlazi iz smanjenja disipativnih gubitaka unutar vodiča. Povećanje napona rezultira smanjenjem omjera između struje i otpora u vodiču, što implicira manje pretvaranje električne energije u toplinsku energiju. To dalje rezultira manjim gubicima snage u obliku topline tijekom prijenosa. Ključno je napomenuti da su disipativni gubici rezultat interakcije više čimbenika. Jedan od presudnih faktora je vrsta materijala od kojeg je vodič napravljen. Različiti materijali posjeduju različite specifičnosti otpora, pa će otpor i gubici varirati ovisno o materijalu vodiča. Stoga se preporučuje upotreba materijala s nižim specifičnim otporom kako bi se smanjili gubici tijekom prijenosa. Također, važnu ulogu u disipativnim gubicima ima i duljina vodiča. Što je vodič dulji, otpor će biti veći, što posljedično rezultira većim gubicima snage.

Ovakva razmatranja o materijalu i duljini vodiča su ključna u optimizaciji efikasnosti prijenosa električne energije putem visokih napona. Uz to, razumijevanje važnosti smanjenja disipativnih gubitaka u postizanju energetske učinkovitosti pomaže oblikovanju pouzdanih i održivih elektroenergetskih sustava. Korištenjem tanjeg presjeka vodiča povećava se njegov otpor, što rezultira većim disipativnim gubicima. U tu svrhu, preporučljivo je koristiti vodiče većeg presjeka kako bi se smanjili gubici tijekom prijenosa.

Važan faktor je također vrsta struje koja se primjenjuje u sustavu. Upotreba istosmjerne struje (DC) može znatno smanjiti gubitke jer struja teče ravnomjerno kroz cijeli presjek vodiča. Suprotno tome, kod korištenja izmjenične struje (AC), pojavljuje se "skin efekt" (koji je ilustriran na slici 3.1.), gdje struja preferira teći blizu površine vodiča, povećavajući ukupni otpor i gubitke snage. Stoga, kad god je to izvedivo, preferiranje upotrebe istosmjerne struje pomaže povećati efikasnost prijenosa električne energije [7].



Slika 3.1. DC (a) i AC (b) raspored struje u presjeku vodiča -skin efekt [7]

Ukupno gledano, optimizacija materijala, duljine i presjeka vodiča, te davanje prednosti istosmjernoj struji, ima ključnu ulogu u značajnom smanjenju disipativnih gubitaka prilikom prijenosa električne energije. Ovo je suštinski važno za povećanje efikasnosti i pouzdanosti visokonaponskih sistema te za prijenos na velike udaljenosti. Takav pristup osigurat će stabilno napajanje električnom energijom u budućnosti.

U tablici 3.1. prikazana je usporedba između HVAC i HVDC kabela iste duljine i istog prijenosnog nazivnog napona. Analizom tablice možemo zaključiti da istosmjerni (DC) prijenos značajno nadmašuje izmjenični (AC) prijenos u kontekstu prijenosa električne energije na velike udaljenosti [7].

Tablica 3.1. Usporedba HVAC i HVDC kabela [7]

	Duljina (km)	Snaga (MW)	Napon (kV)	Gubici (%)
AC	1000/2000	3000	800	6.7/10
DC	1000/2000	6400	800	3.5/5

HVDC (High-Voltage Direct Current) kabeli predstavljaju inovativno rješenje za prijenos električne energije koje nudi niz prednosti u usporedbi s tradicionalnim HVAC (High-Voltage Alternating Current) vodovima. Jedna ključna prednost HVDC kabela je smanjenje potrebne količine materijala za prijenos snage. Zbog upotrebe samo jednog električnog vodiča za transport struje, HVDC kabeli zahtijevaju manje materijala u usporedbi s HVAC vodovima koji koriste tri vodiča za prijenos iste snage. Ovaj reducirani materijal čini HVDC kabele tanjima i lakšima, što

ih čini optimalnim izborom u situacijama gdje su resursi ograničeni ili kada postavljanje velikih i teških električnih vodova predstavlja izazov.

Također, važno je istaknuti da prednost HVDC kabela proizlazi iz manje prostorne potrebe. Ova karakteristika čini ih posebno prikladnima za postavljanje u urbanim područjima ili tamo gdje je dostupnost prostora ograničena. Za osiguranje pouzdane i učinkovite opskrbe električnom energijom, HVDC kabela mogu se lakše integrirati u postojeću infrastrukturu bez potrebe za velikim intervencijama. Dodatna prednost HVDC kabela leži u njihovoj sposobnosti prijenosa električne energije na velike udaljenosti. Za razliku od HVAC vodova koji su ograničeni kapacitivnim gubicima, HVDC kabela nemaju takva ograničenja. Manji kapacitivni gubici omogućuju prijenos električne energije na znatno većim udaljenostima, otvarajući nove mogućnosti za povezanost i prijenos energije među različitim regijama.

Unatoč brojnim prednostima koje HVDC kabela nude, važno je napomenuti da i HVAC i HVDC sustavi imaju svoje specifične primjene i koristi. Konačna odluka o odabiru između ovih dviju tehnologija ovisi o nizu faktora, uključujući udaljenost prijenosa, specifične tehničke zahtjeve, kao i ekonomske i okolišne čimbenike. Obuhvatna analiza ovih faktora ključna je za odabir najprikladnijeg sustava koji će zadovoljiti specifične potrebe i ciljeve električnog prijenosa energije [7].

U proteklim desetljećima, ubrzan tehnološki napredak u području elektroenergetske infrastrukture izazvao je značajne transformacije u načinu prenošenja i distribucije električne energije širom svijeta. Tradicionalno oslonjeni na nadzemne vodove i HVAC tehnologiju, prijenosni sustavi električne energije sada su doživjeli revoluciju zahvaljujući razvoju HVDC sustava i unapređenjima u podzemnim kabelima. Ovi napreci označavaju početak nove ere u elektroenergetskoj industriji.

Velike nacije kao što su Kanada, Sjedinjene Države, Rusija, Brazil i Kina intenzivno razvijaju svoje regionalne elektroenergetske mreže. Ovdje je naglasak na postizanju autonomnosti, istovremeno pojačavajući međusobne povezanosti kako bi se ostvarila veća stabilnost i optimalno iskorištavanje resursa. U ovom kontekstu, HVDC tehnologija je postala neizostavna, omogućujući efikasniji prijenos velikih količina električne energije na značajno udaljenim lokacijama s minimalnim gubicima. Upotreba HVDC sustava, uz korištenje visokonaponskih podmorskih i kopnenih kabela, omogućila je prijenos električne energije preko velikih oceana, preko planinskih lanaca i drugih zahtjevnih terena.

Ova tehnologija pokazala se ključnom za prijenos obnovljive energije proizvedene u udaljenim ruralnim područjima, kao što su vjetroelektrane i solarni parkovi, do gusto naseljenih urbanih središta s visokom potražnjom za energijom. Zahvaljujući napretku u metodama, tehnikama te razvoju novih materijala, stvoreni su pouzdaniji i učinkovitiji HVDC sustavi. Ovaj tehnološki napredak potaknuo je prijenos električne energije na veće udaljenosti i stvorio novu eru komercijalnih mogućnosti. To je rezultiralo brzim usvajanjem HVDC tehnologije u elektroenergetskim mrežama diljem svijeta.

Rastuća popularnost podzemnih kabela također je rezultat njihovih estetskih prednosti i smanjenog potrebnog prostora u usporedbi s nadzemnim vodovima. Važno je napomenuti da podzemni kabeli pružaju povećanu sigurnost i pouzdanost prijenosa električne energije, budući da su manje osjetljivi na vremenske uvjete i vanjska oštećenja.

U 21. stoljeću, elektroenergetska industrija nastavlja svoj inovativni put, razvijajući nove tehnologije s ciljem osiguravanja održivog, čistog i pouzdanog prijenosa električne energije širom svijeta. Intenzivna istraživanja u području superprovodljivosti mogla bi potaknuti daljnje revolucionarne promjene u načinu na koji percipiramo i koristimo električnu energiju. Električne mreže će se nastaviti razvijati kako bi zadovoljile rastuće potrebe modernog društva, ističući efikasnost, održivost i zaštitu okoliša kao ključne aspekte [7].

Izbor za korištenje HVDC-a za prijenos električne energije često se pojavljuje u jednoj od sljedećih situacija:

- Prijenos velikih količina električne energije: Kada je potrebno prenijeti električnu energiju na velike udaljenosti, posebno preko područja s ograničenjima kao što su planine, mora ili pustinje, HVDC postaje preferirana opcija. Na velikim udaljenostima HVAC sustavi mogu imati značajne gubitke energije zbog otpora vodova, što može biti preskupo ili nepraktično. HVDC sustavi smanjuju te gubitke i omogućuju efikasniji prijenos energije na stotine ili čak tisuće kilometara;
- Međupovezanost između dva različita izmjenična sustava. HVDC se često koristi za povezivanje dva izmjenična elektroenergetska sustava koji rade na različitim frekvencijama ili nisu u potpunosti sinkronizirani. Takvi slučajevi često se javljaju kada zemlje ili regije imaju različite standardne frekvencije za svoje elektroenergetske mreže. HVDC omogućuje prijenos energije između tih sustava bez potrebe za pretvornicima frekvencije, što bi bilo skuplje i složenije;

- Poboljšanje funkcioniranja i stabilnosti AC sustava: HVDC sustavi mogu pridonijeti poboljšanju stabilnosti i pouzdanosti postojećih izmjeničnih (AC) elektroenergetskih mreža. Na primjer, HVDC poveznice mogu pomoći u preusmjeravanju energije između različitih regija kako bi se izbalansirala ponuda i potražnja, čime se smanjuje rizik od preopterećenja i osigurava veća pouzdanost cjelokupnog elektroenergetskog sustava;
- Prijenos energije preko podmorja: Kako je potrebno prenositi električnu energiju između kopna i otoka ili između različitih kontinenata putem podmorskih kabela, HVDC se često koristi zbog manjih gubitaka i bolje kontrole prijenosa na velikim udaljenostima;
- Ekološka ograničenja postaju sve važnija tema u elektroenergetskoj industriji. Kako se traži način smanjenja emisija stakleničkih plinova i prijelaz na održive izvore energije, HVDC tehnologija se pokazuje kao koristan alat. Omogućuje prijenose energije iz obnovljivih izvora, kao što su vjetroelektrane i solarni parkovi, iz ruralnih područja do gusto naseljenih urbanih središta s visokom potražnjom za čistom energijom.

Suvremena tehnologija prijenosa električne energije, posebno HVDC (High-Voltage Direct Current) tehnologija, predstavlja impresivnu inovaciju u području elektroenergetike. Ova napredna tehnologija omogućuje iznimno efikasan prijenos velikih količina energije iz elektrana velikih snaga, s posebnim naglaskom na hidroelektrane, do udaljenih potrošača koji se prostiru stotinama ili čak tisućama kilometara. Dva nedavna projekta ističu se kao simboli ove tehnološke evolucije: Xiangjiaba-Shanghai UHVDC veza u Kini i HVDC sustav Rio Madeira u Brazilu.

Xiangjiaba-Shanghai UHVDC veza postavlja nove standarde kao prva svjetska ultra visokonaponska veza. Rad na naponskom nivou od  $\pm 800$  kV, ova izvanredna infrastruktura omogućuje prijenos čak 7200 MW električne energije od udaljene hidroelektrane Xiangjiaba na jugozapadu Kine do glavnog potrošača u Šangaju, koji je udaljen gotovo 2000 km. S izuzetno niskim gubicima procijenjenim na manje od 7%, ova nadzemna mreža jasno dokazuje svoju iznimnu učinkovitost u prijenosu električne energije na velike udaljenosti.

S druge strane, HVDC sustav Rio Madeira predstavlja čak najdužu prijenosnu vezu na globalnoj razini. Sa sposobnošću prijenosa od 6300 MW, ovaj sustav uspješno prenosi energiju iz novih hidroelektrana na rijeci Madeira, blizu Porto Velhoa, do gusto naseljenih urbanih središta na jugoistoku Brazila, prelazeći nevjerojatnu udaljenost od 2375 km. Rad na naponu od 600 kV, ovaj HVDC sustav osigurava stabilan i pouzdan prijenos električne energije na tako velikim udaljenostima.



Svi ovi primjeri nedvojbeno potvrđuju ključnu ulogu koju HVDC tehnologija ima u stvaranju održivih i visoko energetske učinkovitih rješenja za globalni prijenos električne energije. Njihova iznimna efikasnost i minimalni gubici tijekom prijenosa dodatno ističu nezamjenjivost ovih sustava u suvremenim energetske mrežama, omogućujući potpuno iskorištavanje udaljenih energetske resursa i osiguranje pouzdane opskrbe udaljenih potrošača [7].

Kao što je prethodno istaknuto, tehnologija (U)HVDC ima širi opseg primjene osim učinkovitog prijenosa velikih količina električne energije na velike udaljenosti. Ona pruža raznovrsne funkcije i prednosti, posebno kada se suočava s izazovom povezivanja dviju izmjeničnih mreža koje rade na različitim frekvencijama ili fazama. Na primjer, ova tehnologija se pokazuje kao izuzetno pouzdano rješenje kada je potrebno povezati dvije mreže koje operiraju na različitim frekvencijama, kao što je slučaj s 50 Hz u sjeveroistočnom dijelu Japana i 60 Hz u jugozapadnom dijelu Japana. Također, demonstrirala je svoju korisnost u regijama poput Nordela, Baltsoa i UCTE-a gdje postoji potreba za rješenjima koja olakšavaju sinkronizaciju mreža s različitim fazama i frekvencijama [7].

### **3.3. Izmjenični AC podmorski kabeli 110 kV – konstrukcija i tehnički zahtjevi**

Podmorski kabeli za visokonaponsku izmjeničnu struju (HVAC) igraju ključnu ulogu u integraciji obnovljive energije u postojeće elektroenergetske mreže. Oni omogućavaju povezivanje udaljenih izvora električne energije, kao što su vjetroelektrane na moru ili bušotine za naftu i plin. Ovi kabeli su obloženi umreženim polietilenom (XPLE) i proizvedeni kroz proces trostruke ekstruzije, koji istovremeno oblikuje poluvodičke slojeve i izolacijski sloj.

Umreženi polietilen ima karakteristike niske relativne permitivnosti, vrlo malog gubitka snage tijekom prijenosa i visoke dielektrične čvrstoće.

Konstrukcija podmorskih 110 kV kabela:

- 1. Vodiči:** Uobičajeno je da podmorski kabeli napona 110 kV sadrže više vodiča unutar izolacijskog omotača. Ovi vodiči su najčešće izrađeni od bakra ili aluminija jer su to materijali s visokom električnom provodljivošću;
- 2. Izolacija:** Svaki pojedinačni vodič je presvučen izolacijskim materijalom kako bi se spriječio električni kontakt između vodiča i okoline te kako bi se smanjio potencijalni rizik od curenja struje;

- 3. Zaslon izolacije:** Izolirani vodiči često su dodatno zaštićeni slojem nazvanim zaslon izolacije. Ovo pruža mehaničku zaštitu kabela od potencijalnih oštećenja uzrokovanih trenjem o morsko dno, kamenje ili druge potencijalne opasnosti;
- 4. Metalni zaslon:** Zaslon izolacije je obično obuhvaćen dielektričnim (metalnim) materijalom, što doprinosi održavanju električne izolacije između vodiča;
- 5. Vanjski omotač:** Cijeli kabel je prekriven vanjskim omotačem, često izrađenim od materijala kao što su polietilen, poliuretan ili drugi materijali koji su otporni na utjecaje morske vode i uvjete podmorja;
- 6. Dodatne zaštite:** Zaštita od korozije, vodootpornost i druge ključne karakteristike igraju ključnu ulogu u osiguranju dugotrajnosti kabela.

Tehnički zahtjevi:

- 1. Napon:** Kabeli moraju biti sposobni prenositi visoki napon od 110 kV između obala ili otoka;
- 2. Gustoća struje:** Dizajn kabela, mora uzeti u obzir specifičnu gustoću struje kako bi se nosili s toplinskim opterećenjem generiranim električnom energijom koja se prenosi kroz kabel;
- 3. Izolacijska sposobnost:** Izolacijski materijali moraju biti visokokvalitetni kako bi osigurali pouzdanu električnu izolaciju i spriječili curenje struje;
- 4. Mehanička izdržljivost:** Kabeli moraju biti u stanju izdržati mehaničke sile i potencijalna oštećenja, uključujući trenje s morskim dnom, vodene struje i slične utjecaje;
- 5. Otpornost na koroziju:** Materijali koji se koriste za konstrukciju moraju biti otporni na koroziju uzrokovanu morskom vodom i drugim agresivnim okolišnim čimbenicima;
- 6. Instalacija i održavanje:** Konstrukcija kabela mora omogućiti relativno jednostavnu instalaciju i održavanje pod vodom.

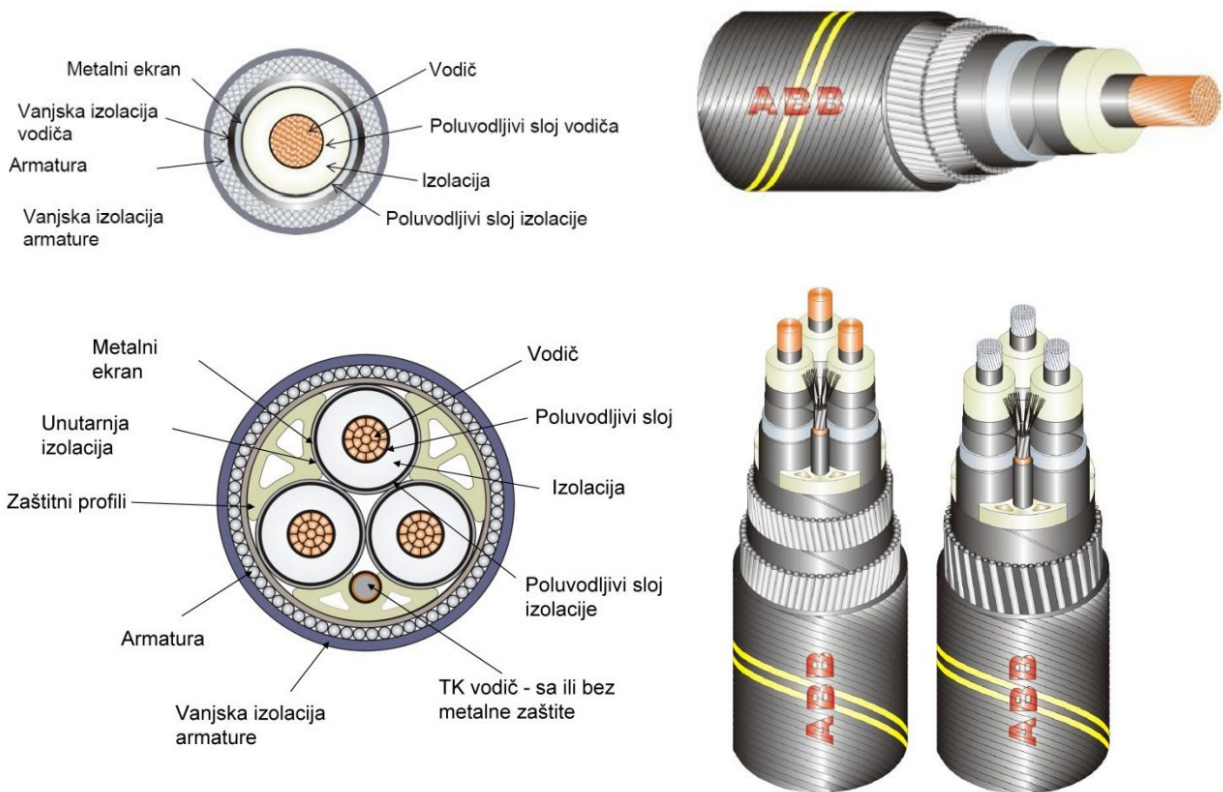
Podmorski električni kabeli za prijenos izmjenične (AC) struje dostupni su u dvije osnovne varijante: trožilni i jednožilni. Trožilni kabeli sastoje se od tri vodiča namijenjenih za prijenos električne energije. Ti vodiči su opremljeni slojevima izolacije kako bi se osigurala otpornost na vanjske utjecaje te kako bi se omogućio siguran prijenos struje. Jednožilni podmorski AC elektroenergetski kabeli imaju samo jedan vodič za prijenos energije, koji je također opremljen izolacijskim slojevima. Ovi jednožilni AC podmorski kabeli polažu se na dno mora s međusobnim razmacima od 20 do 30 metara, iako su mogući i veći ili manji razmaci, ovisno o specifičnim zahtjevima.

Prilikom odabira između trožilnih i jednožilnih AC podmorskih kabela, bitno je uzeti u obzir niz faktora. Ovo uključuje karakteristike trase na morskom dnu, duljinu kabela, metode polaganja i

druge relevantne parametre. Trožilni kabelski vodovi postaju preferirani kada je potrebno ograničiti širinu zauzetog područja na dnu mora. Kod jednožilnih kabela, ključno je osigurati veći razmak između pojedinačnih vodova, obično iznad 20-30 metara.

Iako je tehnički moguće postaviti kabele na manji razmak, to često se izbjegava kako bi se smanjio rizik od istovremenog oštećenja više kabela. No, postavljanje trožilnih kabela zahtijeva složenije postupke zbog njihovih većih dimenzija, posebno promjera. Trožilni kabeli s zajedničkom armaturom imaju prednost manjih gubitaka, djelomično zbog simetričnog rasporeda faznih vodiča. U slučaju jednožilnih kabela, ti gubici mogu biti izraženiji. Međutim, prednost trožilnih kabela kompenzira se povećanim zagrijavanjem zbog blizine faznih vodiča.

Trenutno na tržištu AC kabela, trožilni kabeli su primjetno skuplji u usporedbi s jednožilnim kabelima. Prije 25 godina, trožilni kabeli su bili ograničeni u smislu dostupne udaljenosti zbog tehničkih izazova u proizvodnji kompletnih kabela. No, današnji proizvođači omogućili su isporuku trožilnih kabela za naponske nivoe između 100-170 kV na duljinama većim od 50 km, što značajno proširuje mogućnosti njihove primjene.



Slika 3.2. *Primjer jednožilnog i trožilnog podmorskog kabela* [8]

Slika 3.3. prikazuje prvi svjetski podmorski kabel s nazivnim naponom od 420 kV, koji istovremeno predstavlja najviši naponski trožilni AC podmorski kabel koji prelazi tjesnac Little Belt u Danskoj. Ovaj kabelski sustav ne ostavlja nikakve vizualne tragove na okolišu te čini sastavni dio sheme za vizualno poboljšanje tog područja.



Slika 3.3. *Podmorski kabel najvišeg nazivnog napona ( $U_n=420$  kV, AC)* [15]

Na slici 3.4. prikazan je najduži podmorski HVAC (visokonaponski izmjenični strujni) kabel na svijetu, koji ima duljinu od 163 km i povezuje naftno i plinsko polje u Sjevernom moru poznato kao Martin Linge. Upotreba obnovljive energije s obale putem ovog kabela smanjuje negativan utjecaj na okoliš s godišnjom uštedom od oko 200 000 tona CO<sub>2</sub>.

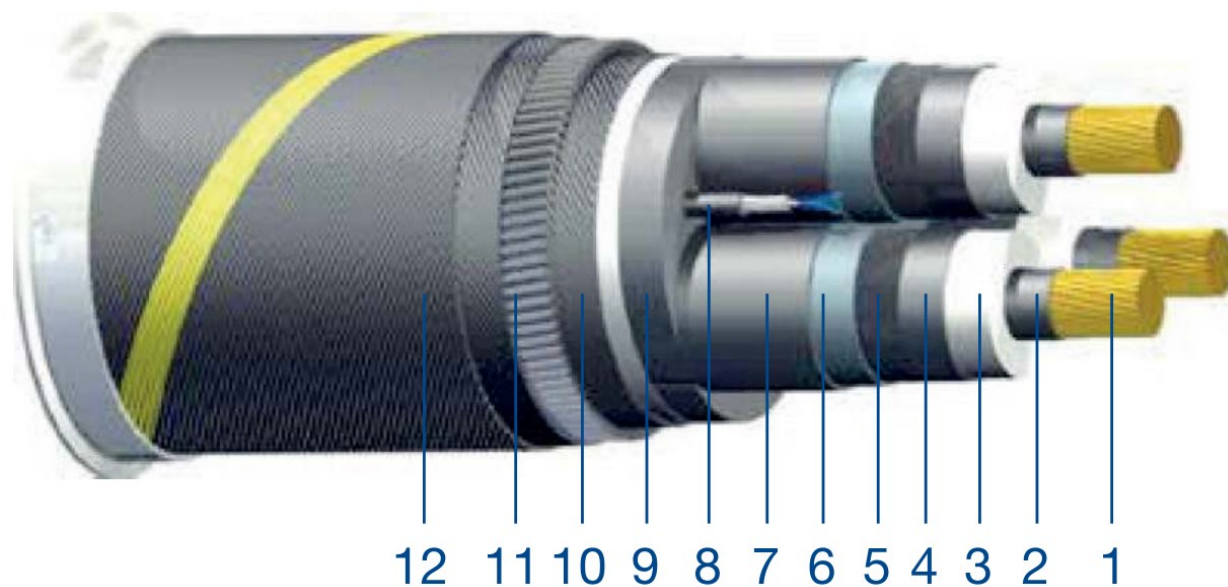


Slika 3.4. Podmorski AC kabel najveće duljine na svijetu ( $l=163$  km) [15]

### 3.3.1. Primjeri izmjeničnih AC podmorskih kabela

#### Trožilni podmorski kabeli s olovnim omotačem

Građa trožilnog podmorskog kabela prema IEC standardu prikaza je slikom 3.5. Osnovni dijelovi specificirani su niže navedeni u nastavku.



Slika 3.5. Trožilni podmorski kabel s olovnim omotačem [9]

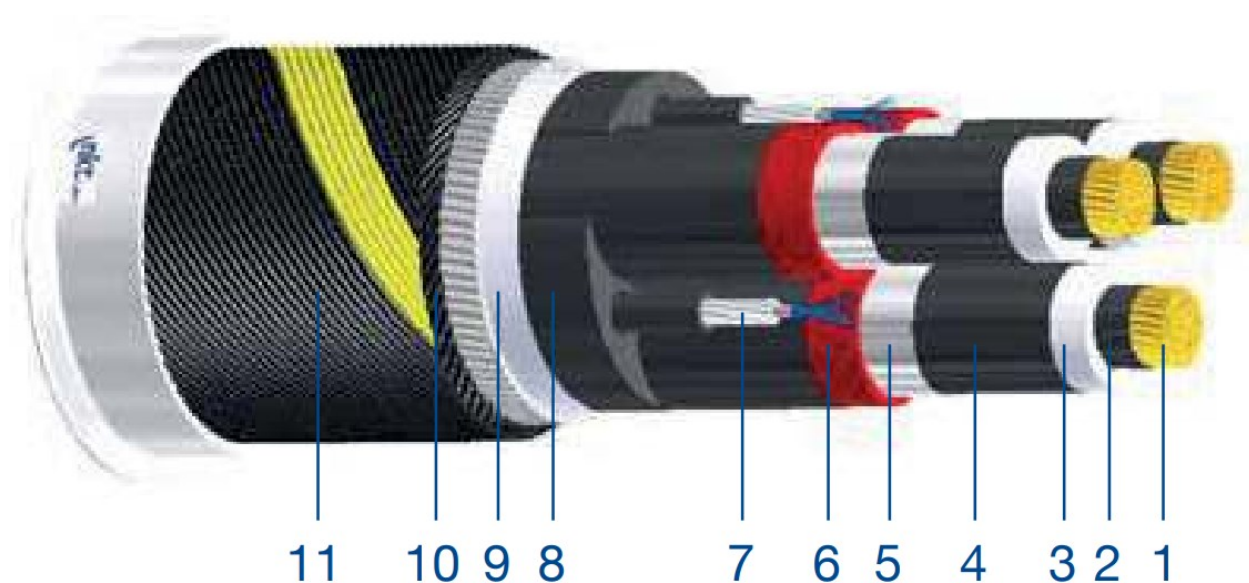
1. Vodič (aluminij ili bakar)
2. Unutarnji poluprovodljivi sloj
3. XPLE (umrežena polietilenska) izolacija
4. Vanjski poluprovodljivi sloj
5. Bubriva traka
6. Olovni omotač
7. PE (polietilenski) plašt
8. Kabel s optičkim vlaknima
9. Profili za punjenje
10. Sloj izolacije vodiča
11. Armatura kabela
12. Vanjski omotač kabela

Kabel se izrađuje za napone do 420 kV u obliku okruglog vodiča, koji može biti s punim presjekom ili višežilne izvedbe (izrađen od aluminija ili bakra). Olovni omotač osigurava zaštitu od prodora vode, a integrirana optička vlakna omogućuju nadzor temperature i uspostavu komunikacije. Ti

kabli su prikladni za postavljanje kako u zemlju, tako i u vodu. Mogu se polagati direktno u zemlju, u kanale ili u žljebove za kanale.

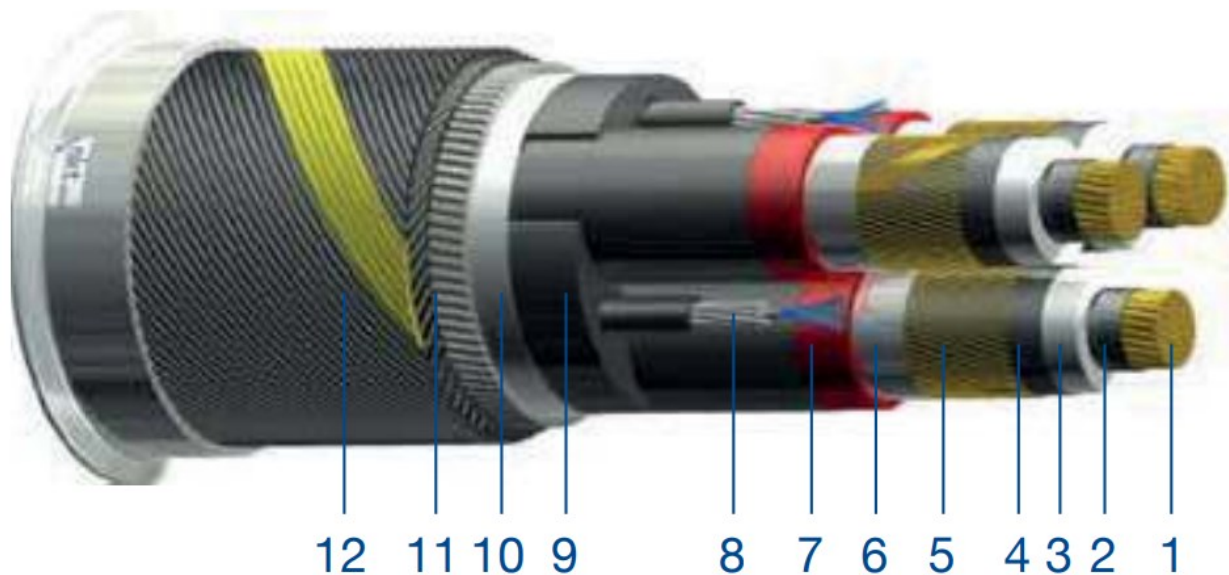
### Trožilni podmorski kabeli s laminiranim aluminij-polietilenskim omotačem

Građa trožilnog podmorskog kabla prema IEC standardu prikazana je slikom 3.6. i 3.7. Osnovni dijelovi specificirani su niže navedeni u nastavku.



Slika 3.6. Trožilni podmorski kabel s laminiranim aluminij-polietilenskim omotačem [10]

1. Vodič (aluminij ili bakar)
2. Unutarnji poluprovodljivi sloj
3. XPLE (umrežena polietilenska) izolacija
4. Vanjski poluprovodljivi sloj
5. Aluminijska traka
6. PE (polietilenski) plašt s poluprovodljivim površinskim slojem  
\*5.+6.→Laminirani aluminij-polietilenski omotač
7. Kabel s optičkim vlaknima
8. Profil za punjenje
9. Sloj izolacije vodiča
10. Armatura kabla
11. Vanjski omotač kabla



Slika 3.7. Trožilni podmorski kabel s laminiranim aluminij-polietilenskim omotačem [11]

1. Vodič (aluminij ili bakar)
2. Unutarnji poluprovodljivi sloj
3. XPPE (umrežena polietilenska) izolacija
4. Vanjski poluprovodljivi sloj
5. Žičani zaslon (aluminij ili bakar)
6. Aluminijska traka
7. PE (polietilenski) plašt s poluprovodljivim površinskim slojem  
\*6.+7.→Laminirani aluminij-polietilenski omotač
8. Kabel s optičkim vlaknima
9. Profil za punjenje
10. Sloj izolacije vodiča
11. Armatura kabela
12. Vanjski omotač kabela

Kabel se izrađuje za napone do 72,5 kV u obliku okruglog vodiča, koji može biti s punim presjekom ili višežilne izvedbe (izrađen od aluminija ili bakra). Olovni omotač stvara vodenu barijeru, dok integrirana optička vlakna omogućuju nadzor temperature i pružaju komunikacijske mogućnosti. Ovi kabeli su prikladni za polaganje i u zemlju i u vodu. Mogu se postaviti direktno u zemlju, kanale ili žljebove za kanale.



### 3.4. Istosmjerni DC podmorski kabeli 110 kV – konstrukcija i tehnički zahtjevi

Prva HVDC veza Gotland (Gotland 1) je uspostavljena 1954. godine. Ova veza je omogućavala prijenos snage od 20 MW putem podmorskog kabela koji je bio dug 98 km. Kabel je povezivao kopno, točnije Västervik, sa otokom Gotland, konkretno sa naseljem Ygne. Prijenos se odvijao pri naponu od 100 kV. Za realizaciju pretvorbe između izmjenične i istosmjerne struje koristile su se živine ispravljačice, poznate kao Mercury arc valves.

Prvi projekt koji je primijenio HVDC napon od 320 kV za dugotrajnu i dugometnu morsku poveznicu prema priobalnoj vjetroelektrani (offshore wind power) bio je Dolwin 1 u Njemačkoj.

Visokonaponski istosmjerni (DC) podmorski kabeli, kao što su oni snage 110 kV, predstavljaju izazovne tehničke konstrukcije od iznimne važnosti. Njihova glavna svrha je omogućiti transport električne energije ispod vodenih površina. Ovi kabeli imaju ključnu ulogu u povezivanju energetske sustava između kopnenih područja i otoka te omogućuju efikasan prijenos značajnih količina energije na velike udaljenosti. Primjenom ovih kabela prepoznaju se brojne prednosti, ali isto tako se suočavaju i s raznim izazovima.

Prednosti:

- 1. Udaljeni prijenos energije:** Istosmjerni (DC) podmorski kabeli omogućuju efikasan prijenos električne energije na velike udaljenosti uz minimalne gubitke. Ova sposobnost je posebno korisna za povezivanje udaljenih regija ili otoka s glavnim energetske mrežama;
- 2. Minimalni gubici:** Nasuprot izmjeničnim (AC) strujnim sustavima, istosmjerni (DC) kabeli karakteriziraju manji gubitak energije tokom prijenosa, što rezultira poboljšanom efikasnošću transporta na većim udaljenostima;
- 3. Stabilnost mreže:** Ovi kabeli mogu pridonijeti stabilnosti elektroenergetskih sustava tako da omogućuje preusmjerenje energije u situacijama kao što su preopterećenja ili kvarovi, čime se osigurava bolja reakcija na takve izazove.

Izazovi:

- 1. Tehnička složenost:** Instalacija i održavanje podmorskih kabela zahtijeva visok nivo tehničke stručnosti i posebnu opremu. Ključni aspekti u ovom procesu uključuju osiguranje otpornosti na koroziju i mehanička naprezanja, kao i osiguranje zaštite od potencijalnih oštećenja;

- 2. Troškovi:** Izgradnja i održavanje podmorskih kabela često predstavlja značajnu financijsku investiciju zbog potrebe za specijaliziranom opremom, istraživanjem morskog dna te osiguravanjem dugotrajnosti i sigurnosti kabela;
- 3. Utjecaj na okoliš:** Postavljanje podmorskih kabela može imati značajan utjecaj na morski ekosustav i biološku raznolikost. Stoga je kod izgradnje nužno provesti temeljite studije utjecaja na okoliš. Važno je napomenuti da se isti izazovi odnose i na izmjenične (AC) podmorske kabele.

S rastućom potrebom za postizanjem energetske neovisnosti i povezivanjem udaljenih regija, istosmjerni (DC) podmorski kabele postaju sve ključniji za globalnu energetska infrastrukturu. Kroz stalne inovacije u tehnologiji i inženjeringu, očekuje se kontinuirano unaprjeđivanje performansi ovih kabela, smanjenje njihovih troškova te minimiziranje negativnih utjecaja na okoliš.

Konstrukcija podmorskih 110 kV kabela:

Istosmjerni (DC) podmorski kabele napona 110 kV, poput izmjeničnih (AC) kabela, konstruirani su od različitih slojeva i komponenata koje zajedno osiguravaju siguran i učinkovit prijenos električne energije;

- 1. Vodiči:** Poput AC kabela, vodiči su izrađeni od visokokvalitetnih provodnih materijala poput bakra i aluminijskih, što osigurava nizak otpor i minimalne gubitke energije tijekom prijenosa;
- 2. Izolacija:** Svaki vodič mora biti prekriven izolacijskim slojem kako bi se spriječilo curenje struje i održala električna izolacija između vodiča i okoline;
- 3. Zaslon izolacije:** Zaslon izolacije je materijal koji dodatno osigurava izolaciju i održava konstantno električno polje unutar kabela;
- 4. Otporni sloj:** Otporni sloj štiti kabel od vanjskih oštećenja, korozije i infiltracije vode;
- 5. Metalni zaslon:** Metalni zaslon pruža mehaničku zaštitu kabele, smanjujući rizik od oštećenja uslijed trenja s morskim dnom, stijenama ili drugim potencijalnim čimbenicima;
- 6. Vanjski omotač:** Kao vanjski sloj, omotač štiti kabel od vodenih uvjeta, korozije i ostalih vanjskih faktora.

Tehnički zahtjevi:

- 1. Napon:** Kabeli su projektirani za prenošenje visokog istosmjernog (DC) napona od 110 kV, čime omogućuju efikasno prenošenje energije na znatnim udaljenostima;
- 2. Gustoća struje:** Kabeli moraju biti sposobni prenositi odgovarajuću gustoću struje kako bi ispunili potrebe prijenosa energije uz minimalne gubitke;

3. **Izolacijska sposobnost:** Kvalitetna izolacija i dielektrični materijali osiguravaju odsustvo curenja struje i održavaju potrebnu izolaciju;
4. **Mehanička izdržljivost:** Kabeli moraju biti otporni na mehaničke sile, trenje s morskim dnom i moguća oštećenja kako bi osigurali pouzdan rad tijekom cijelog vijeka trajanja;
5. **Otpornost na koroziju:** Materijali koji se koriste za konstrukciju moraju biti otporni na koroziju izazvanu morskom vodom i drugim agresivnim okruženjima;
6. **Elektromagnetska kompatibilnost:** Kabeli se moraju konstruirati kako bi se smanjile elektromagnetske smetnje i interferencije koje bi mogle utjecati na druge sustave;
7. **Upravlјivost i kontrola:** Istosmjerni (DC) podmorski kabeli često se koriste za povezivanje različitih energetske sustava, stoga zahtijevaju sustave upravljanja i kontrole koji omogućuju optimalno upravljanje prijenosom energije.

#### 3.4.1. Primjeri istosmjernih DC podmorskih kabela

Istosmjerni (DC) kabeli imaju izuzetno važnu ulogu u efikasnom i pouzdanom prijenosu električne energije preko vodenih površina poput mora i jezera. Zahvaljujući visokonaponskim istosmjernim (HVDC) kabelima, postaje moguće prenositi značajne elektroenergetske kapacitete na iznimno velike udaljenosti. Ovi kabeli omogućuju transport snage od nekoliko stotina pa čak do nekoliko tisuća megavata (MW), posebno u dvopolarnim sustavima.

Unutar HVDC sustava, postoje četiri osnovne kategorije podmorskih kabela, koje se klasificiraju prema vrsti izolacije:

1. Izolirani uljim papirom (2 tipa: maseni impregnirani i ispunjeni uljem)
2. Izolirani polipropilen-laminatnim papirom (PPLP) ili polipropilenskim laminatom (PPL)
3. Ispunjen plinom
4. Ekstrudirani (XLPE, termoplastični)

#### **Jednožilni podmorski kabeli s masenim impregniranim papirom**

U većini postojećih HVDC veza često se koristi navedeni kabeli. Njegov nazivni napon može doseći čak 600 kV, omogućujući prijenos snage od 1000 MW (1 GW) putem jednog kabela. Ovi kabeli mogu se koristiti čak i pod vodenim dubinama do 1640 m, a duljina njihovog prijenosa praktički je neograničena. Osmišljeni su sa slojevitom strukturom koja se međusobno integrira kako bi tvorila funkcionalnu cjelinu.



Slika 3.8. Maseni impregnirani HVDC podmorski kabel, tipične težine 30 do 60 kg/m, tipičnog promjera 110 do 140 mm [12]

Ovaj kabel ima osnovnu strukturu koja se formira tako da se vodič oblikuje pletenjem bakrenih ili aluminijskih žica oko centralne kružne šipke. Taj vodič je zaštićen slojem izolacije napravljenim od papira impregniranog uljem i smolom. Iza tog sloja smješten je sloj od ugljičnog papira. Cijeli kabel je potpuno impregniran, a vanjski olovni omotač djeluje kao zaštita izolacije od vanjskih utjecaja. Slijedi sloj polietilenske obloge koji pruža zaštitu od korozije. Taj sloj je opet obložen pocinčanim čeličnim trakama koje osiguravaju da kabel ne doživljava trajne deformacije tijekom procesa utovara. Preko čeličnih traka stavlja se sloj polipropilenske trake napravljene od termoplastičnog materijala. Završni sloj ovog kabela sastoji se od čeličnih okruglih/ravnih žica koje tvore vanjski omotač kabela. Kapacitet prijenosa ovog kabela, koji je impregniran s gustim materijalom, ograničava temperatura vodiča (najviše 55°C), što rezultira ograničenom sposobnošću preopterećenja.

### Uljni kabeli

Uljni kabeli su najstariji tip visokonaponskih kabela, razvijeni još od 1927. godine, te njihova osnovna konstrukcija nije značajno promijenjena od tada. Ključna karakteristika ovih kabela je način integracije ulja kao izolacijskog materijala unutar samog kabela. Ulje niske viskoznosti ravnomjerno se distribuira kroz cijelu dužinu kabela. Kod jednožilnih kabela, ulje ispunjava središnji dio kabela dok se vodič omata oko njega. Kod višežilnih kabela, ulje je prisutno između

žila i olovnog plašta. Ovi kabeli se razlikuju po tlaku pod kojim se ulje nalazi unutar kabela – niskotlačni i visokotlačni. Bez obzira na tlak, unutar kabela postoji određeni predtlak. Promjene temperature ulja tijekom rada uzrokuju širenje volumena i povećanje tlaka unutar kabela. Kako bi se izjednačio tlak, postavljaju se posude za izjednačavanje duž postrojenja i kabela.

Bitna razlika između uljnih kabela i običnih impregniranih kabela je u vodiču. Uljni kabeli koriste vodič izoliran papirom natopljenim uljem niske viskoznosti. Kabel ima unutarnji kanal kroz koji ulje protječe kroz cijelu dužinu. Ostali slojevi konstrukcije su slični impregniranim kabelima. Uljni kabeli su prikladni za prijenos izmjeničnih (AC) i istosmjernih (DC) napona, s naponskim razinama do 600 kV. Često se koriste na velikim dubinama. Važno je napomenuti da su duljine uljnih kabela ograničene na manje od 100 km zbog potrebe za kontinuiranim protokom ulja za ispravan rad i hlađenje. Dulji kabeli nose veći rizik od curenja ulja, što može rezultirati zagađenjem okoliša u slučaju propuštanja. Ova ograničenja treba uzeti u obzir pri planiranju i instalaciji uljnih kabela. Uljni kabeli mogu se podijeliti na:

- Jednožilni uljne „Single-core oil filled“ (SCOF) – niskotlačni uljni;
- Popunjeni visokotlačnim uljem „High pressure oil filled“ (HPOF) – kabeli se postavljaju u cijev napunjenu visokotlačnim uljem.



Slika 3.9. SCOF HVDC kabel tipične težine 40 do 80 kg/m, promjera 110 mm do 160 mm [12]

Niskotlačni uljni kabeli se proizvode s unaprijed definiranim tlakom od 0,03 do 0,6 MPa. Eventualne šupljine unutar izolacije se ispunjavaju uljem kako bi se očuvala stabilna izolacijska svojstva. Kako bi se izbjegli problemi povezani s varijacijama tlaka uzrokovanim temperaturnim promjenama unutar kabela, koriste se spremnici za izjednačavanje tlaka. Ovi spremnici su gusto raspoređeni prema izračunima kako bi se spriječili nepoželjni podtlak ili predtlak. Smještaju se ili unutar pristupačnih kućica ili u podzemne šahtove.

Osnovna karakteristika uljnih kabela je njihova sposobnost održavanja normalnog električnog rada čak i nakon gubitka ulja uslijed oštećenja konstrukcije kabela. Ova svojstva osiguravaju kontinuiranu funkcionalnost uljnih kabela u slučaju problema. Za pojačavanje kabela i osiguranje njegove strukturne čvrstoće, obavezno se koriste bandaže.

Kod strmog polaganja kabela, moguće je da unutarnji tlak premaši uobičajene granice, što može uzrokovati oštećenje izolacije. Kako bi se spriječili ti problemi, dodatno se ojačava kabel pomoću bandaža kako bi se osigurala njegova izdržljivost. Za rješavanje problema visinskih razlika, koristi se strategija podjele kabela na sektore uz pomoć zapornih spojki koje sprječavaju cirkulaciju ulja. Ova metoda pomaže održavanju stabilnosti unutar kabela i sprečava nagle promjene tlaka povezane s visinskim razlikama.

Konstruktivna struktura visokotlačnih uljnih kabela gotovo je identična onoj niskotlačnih kabela, no njihova specifična karakteristika leži u bandaži koja je prilagođena izdržavanju znatno većih tlakova, obično između 1 i 2,5 MPa. Visokotlačni uljni kabeli često koriste i trožilne konfiguracije s čeličnom cijevi umjesto klasične bandaže, omogućujući rad pod tlakovima do 1,5 MPa. Regulacija tlaka kod visokotlačnih kabela provodi se na način sličan niskotlačnim kabelima, gdje se koriste veći spremnici za izjednačavanje tlaka ili čak automatski kontrolirane pumpe.

Tlačni uljni kabeli su specijalizirani maseni kabeli koji se primjenjuju u visokonaponskim sustavima. Oni su napunjeni tvari koja ima slična svojstva kao ulje u tradicionalnim uljnim kabelima. Kada se kabel zagrije, ova tvar se izbacuje iz kabela kako bi osigurala termičku stabilnost. Nakon što se kabel ohladi, izbačena tvar se vraća natrag u izolaciju kabela. Tlačni kabeli često imaju oblik cijevi. No, jedna od njihovih mana, osobito pri visokim naponima, je da volumen izolacije značajno raste. Ova karakteristika ograničava praktičnu primjenu tlačnih kabela u visokonaponskim sustavima. Zbog toga se tlačni kabeli rijetko koriste kao glavna opcija za izgradnju visokonaponskih kabelskih mreža.

## PPLP kabeli

Radi se o kabelima koji su izolirani tankim slojem polipropilenskog laminata (PPL) ili polipropilen-laminatnog papira (PPLP). Ovi kabeli su specifično projektirani za upotrebu u dugim i dubokim podmorskim HVDC (high-voltage direct current) vezama. Postoje dvije varijante PPLP kabela: OF-PPLP kabeli, koji su impregnirani neviskoznom uljima, te MI-PPLP kabeli, koji su impregnirani viskoznom neisušujućim uljima. Ova tehnologija slična je onoj koja se koristi za masene impregnirane neisušujućim uljnim kabelima. Ovaj tip kabela ima sposobnost rada pri visokim temperaturama od 80-90°C i može izdržati električno opterećenje koje je do 60% veće u usporedbi s masenim impregniranim kabelima. Važno je napomenuti da se ova tehnologija još uvijek razvija za primjenu u DC (direct current) kabelima.

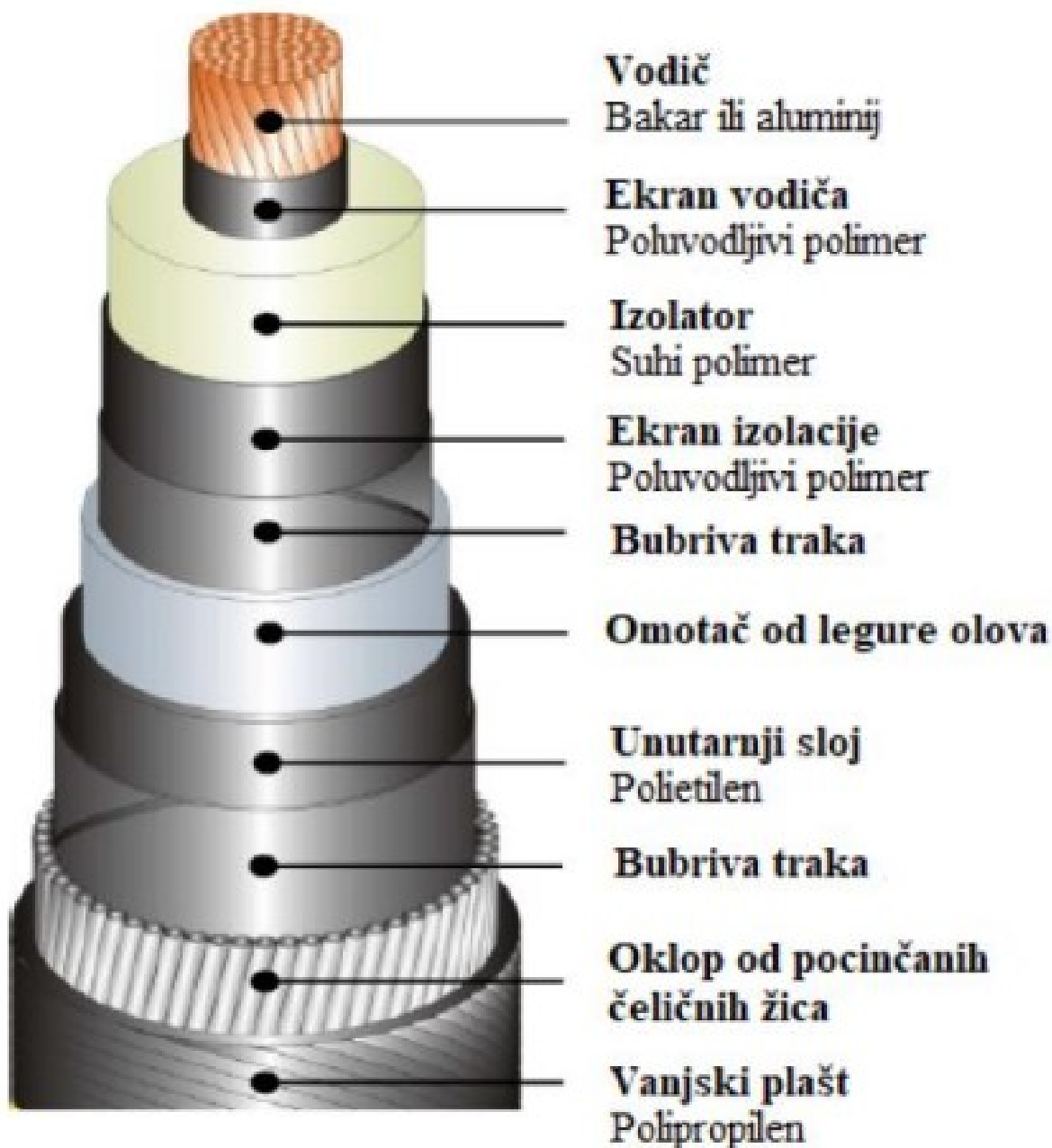


Slika 3.10. MI-PPLP HVDC kabel [12]

## Ekstrudirani kabeli (XLPE kabeli)

Kako bi se prevladali specifični nedostaci prethodno spomenutih tipova kabela, pojavljuju se XLPE kabeli s izolacijom od umreženog polietilena. XLPE kabeli koriste izolaciju napravljenu od umreženog polietilena, sposobnu izdržati radne temperature do 70°C za istosmjernu struju i do 90°C za izmjeničnu struju. Također, mogu podnijeti kratkotrajne povećane temperature do čak 250°C u slučaju kratkog spoja. Provodnik je konstruiran od okruglih bakrenih žica. Ovaj tip kabela je lakši, fleksibilniji i jednostavniji za spajanje u usporedbi s maseno impregniranim kabelima, što ih čini praktičnijima za transport i instalaciju.

Dodatna prednost ovih kabela je njihova ekološka prihvatljivost, jer ne zahtijevaju ulje za impregnaciju. Važno je napomenuti da se XLPE kabele primarno koriste za niže naponske nivoe u odnosu na prethodne tipove kabela. Međutim, mogu se pojaviti lokalni defekti u izolaciji, poznati kao točkasti defekti. Spomenuti tip kabela često se koristi u vezi s VSC pretvaračima.



Slika 3.11. HVDC XLPE kabele tipične težine 20 do 30 kg/m, promjera 90 do 120 mm [12]



Tablica 3.2. Prednosti i nedostaci ekstrudiranih (XLPE) kabela u odnosu na kabele izolirane uljnim papirom [12]

Prednosti	Nedostaci
Manji troškovi	Točkasti efekt
Jednostavnije, brže i lakše spajanje	Površinski naboj i promjene polariteta
Ekološki prihvatljivije - bez izlivanja ulja	Niži naponi
Viša temperatura vodiča: ➤ HVAC XLPE 90 °C, K.S. 250 °C ➤ HVDC XLPE 70 °C	

### Kabeli ispunjeni plinom

Plinski kabeli koriste plin, kao što su SF<sub>6</sub> ili dušik, zajedno s viskozim uljem, kao izolacijsko sredstvo kako bi osigurali efikasnu izolaciju i zaštitu vodiča. Plinovi kao izolatori imaju prednost nad zrakom jer imaju veću električnu probijenost, čime se smanjuje rizik od električnih pražnjenja i tinjavih izbijanja. Ulje visoke viskoznosti pomaže u zaštiti vodiča od udarnih prenapona i sprečava cirkulaciju mase duž kabela.

Plin se koristi pod tlakom, obično između 1 i 1,5 MPa, ili više kod podmorskih kabela, kako bi se osigurala stabilna izolacija. Regulacija tlaka plina je jednostavnija u usporedbi s regulacijom tlaka ulja. Plinski kabeli su agilniji jer plin nije tako viskozan kao ulje, omogućujući postavljanje posuda za izjednačavanje tlaka na krajevima kabela bez obzira na njihovu duljinu.

Postoje različite varijante plinskih kabela, uključujući fleksibilne i nefleksibilne izvedbe, kao i jednožilne i trožilne konfiguracije (samo u AC sustavima). Iako plinski kabeli nude prednosti kao što su veća električna probijenost i ekološka prihvatljivost zbog lakše obrade plina u slučaju curenja ili pucanja kabela, postoji ograničenje u kapacitetu prijenosa struje zbog deblje izolacije, što smanjuje kapacitet prijenosa struje.

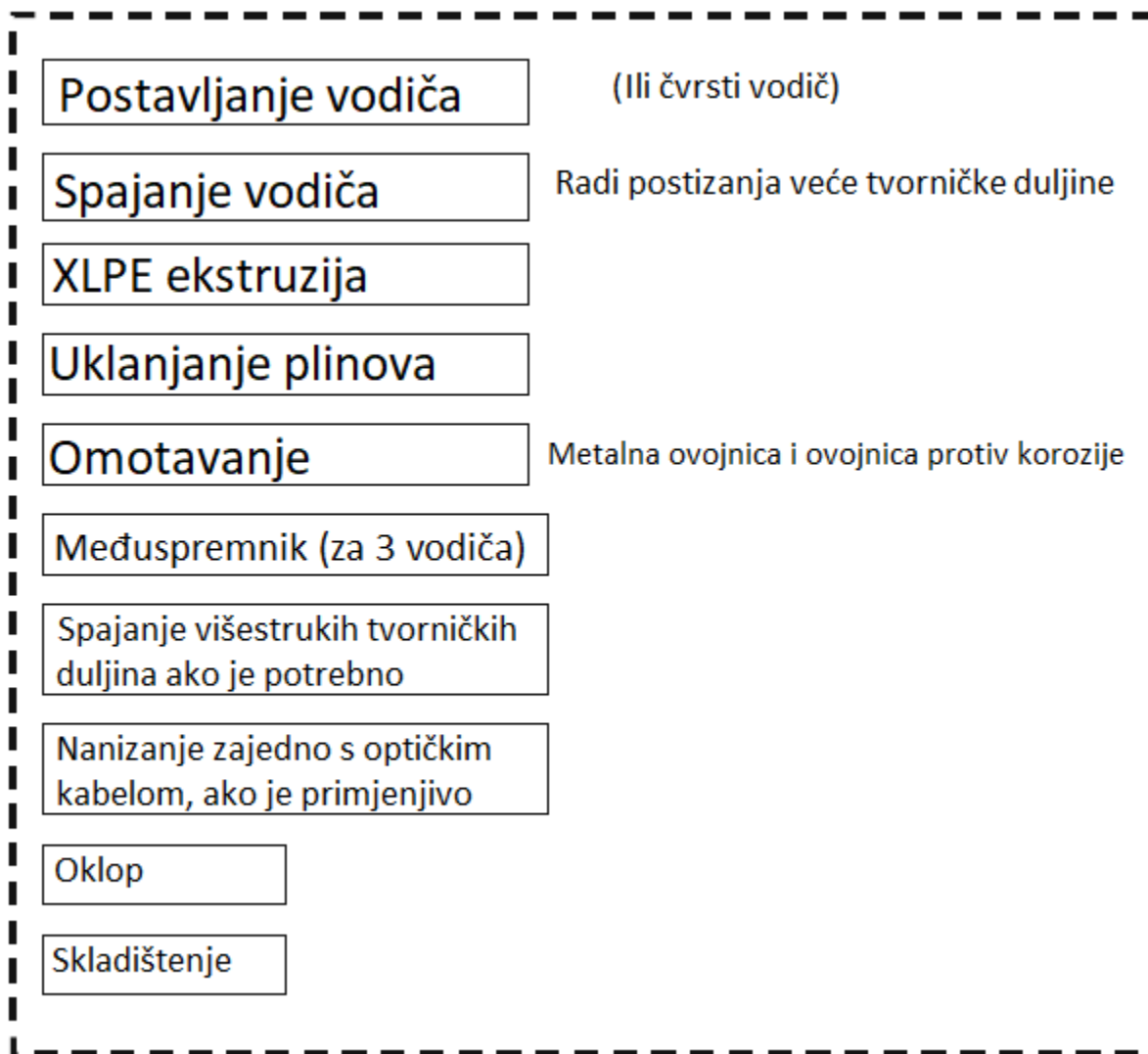
U konačnici, plinski kabeli predstavljaju složenu tehničku soluciju koja balansira prednosti veće električne probijenosti plina s potrebom za kompenzacijom deblje izolacije kako bi se postigao optimalan prijenos struje.

#### **4. INFRASTRUKTURA PODMORSKIH KABELSKIH VODOVA**

Proces proizvodnje kopnenih kabela uključuje postupno dodavanje slojeva na vodič kako bi se stvorila ravna sekvencija koraka. Fleksibilnost u premještanju kabela između različitih faza proizvodnje omogućena je zbog kratke duljine proizvodnje, obično duljine na bubnju. Ovaj postupak omogućuje postupno nanošenje slojeva sve dok se ne primijeni završni sloj. Nakon što je završni sloj nanesen, kabela su podvrgnuti konačnom ispitivanju kako bi se utvrdila njihova prihvatljivost.

S druge strane, podvodni električni kabela često se isporučuju u izuzetno dugim dužinama, ograničenim kapacitetom broda za polaganje kabela, koji može iznositi nekoliko tisuća tona. Kako bi se izbjegao velik broj spojeva, svi koraci proizvodnje moraju se izvoditi na što duljim dužinama.

Maksimalna neprekidna duljina svakog koraka proizvodnje varira prema veličini i tipu kabela. Često nije potpuno izvodljivo postići potpunu usklađenost duljina između različitih koraka proizvodnje, stoga je potrebno složeno planiranje optimalne iskoristivosti proizvodnih resursa. Isključivo temeljita organizacija tvornice omogućuje maksimalno iskorištavanje prednosti dugih isporuka.



Slika 4.1. Dijagram toka za proizvodnju trožilnih podvodnih kabela s ekstrudiranom izolacijom

[13]

Središte podvodnih kabela sastoji se od vodiča, električnog izolacijskog sustava te zaštitnih omotača kao što su omotači od olova i PE omotači. Proces stvaranja jezgri podvodnih kabela gotovo identičan procesu izrade jezgri kopnenih kabela, a u ovom dijelu prikazan je u sažetom obliku. Ovaj odsječak fokusira se na proizvodne korake koji su specifični za podvodne energetske kabele.

#### 4.1. Elementi kabela

##### 4.1.1. Vodič

Svaki proces proizvodnje kabela započinje stvaranjem vodiča. Metode za izradu vodiča su slične onima koje se primjenjuju kod podzemnih kabela. Međutim, vodič izrađen od unaprijed

profiliranih Cu ili Al žica obično se koristi gotovo isključivo za podvodne HVDC kabele, gdje kompaktni vodič ima veće prednosti u usporedbi s kabelima koji prenose izmjeničnu struju (AC). Za kabele koji se impregniraju masom, ključno je da su žice postavljene blizu jedna drugoj, kako ne bi ostavile prostor za dodatnu impregnacijsku smjesu [14]. Dizajn žica i proces izrade moraju biti pažljivo usklađeni kako bi se izbjegli razmaci između žica ili tzv. "koraci", koji rezultiraju neujednačenim rasporedom profiliranih žica i dovode do stvaranja površine vodiča slične zubima pile. Precizno podešena linija za oblikovanje vodiča rezultira potpuno glatkim vodičem. Postignute su veličine vodiča do približno 3000 mm<sup>2</sup>.

Neki proizvodni pogoni su sposobni stvarati neprekidne vodiče duljine do 20-30 km, iako većina tvornica proizvodi vodiče na kabelskim bubnjevima čija duljina obično iznosi svega nekoliko kilometara. Vodovi se mogu povezivati prije prelaska na sljedeći proizvodni korak putem različitih tehnologija za spajanje:

- Zavarivanje u jednom komadu kroz presjek
- Zavarivanje žica po žica
- Loptasto lemljenje ili brasiranje
- Strgnuta spojnica za kompresiju

Kod spajanja vodova u kabelima ispunjenim tekućinom (a ne masom impregniranim), nužno je osigurati centralni prolaz za ulje. Sve veze vodova moraju se pažljivo izvesti kako bi se osigurala dovoljna mehanička čvrstoća i glatka površina. Posebno je bitno izbjegavati postupak "hladnog" lemljenja, jer bi to moglo rezultirati razdvajanjem krajeva žica tijekom budućeg savijanja kabela te čak probijanjem zaštitnog sloja vodiča iznutra. Spajanje vodova također mora zadovoljiti stroge zahtjeve za vučnu čvrstoću, posebno kada se radi o podvodnim kabelima na većim dubinama. Područje s obje strane zavarenog spoja često je mekše od samog zavarenog spoja ili vodiča, zbog toplotnog utjecaja.

Čest zahtjev za podvodne energetske kabele je osiguravanje uzdužne nepropusnosti za vodu unutar vodiča. Ovo se postiže uvođenjem različitih materijala za blokiranje vode, kao što su sredstva za bubrenje, bubrene niti, hidrofobni spojevi ili gelovi. Ovi materijali se stavljaju između slojeva žica unutar kabela.

Otpor vodiča treba redovito provjeravati u skladu sa sustavom ocjenjivanja kvalitete koji je uspostavio proizvođač.

Nakon toga slijedi primjena izolacije kao sljedeći korak u proizvodnom procesu. U modernim podvodnim energetske kablama koriste se isključivo ekstrudirana XLPE izolacija ili izolacija s premazanim papirom. Ovi dva postupka se značajno razlikuju po materijalima, opremi i karakteristikama proizvodnje.

#### 4.1.2. XLPE izolacija kabela

Ekstruzija XLPE materijala predstavlja kontinuirani proces. Osnovna sirovina je sofisticirana smjesa temeljena na polietilenskoj smoli s precizno definiranim distribucijom molekulske mase, dodanim antioksidansima i sredstvima za umrežavanje. Ova smjesa dolazi u obliku granula i dostupna je u različitim razredima čistoće, pri čemu veći napon zahtijeva višu čistoću. Svojstva poluvodičke smjese koja čini vodički ekran i izolacijski ekran prilagođena su izolacijskoj smjesi. Postoje glatke i ultra-glatke varijante s obzirom na glatkoću unutarnje površine, koja je izložena visokim naprezanjima.

Gotovo sve moderna oprema za ekstruziju srednjeg i visokog napona primjenjuje trostruki koncept ekstruzije. Tri ekstruzijska vijka dovode komponentne materijale do zajedničke glave za ekstruziju, koja koncentrično ekstrudira sva tri sloja u jednom postupku. Proizvodnja izolacijskog sustava izvodi se pomoću ekstruzijskih linija koje mogu biti spuštene ili vertikalne. Iako je duljina ekstruzije od 2000 m dovoljna za izradu podzemnih kabela na bubnjevima, duge isporučene duljine podvodnih kabela zahtijevaju značajno dulje neprekidne duljine ekstruzije kako bi se smanjio broj spojeva. Duljine veće od 20 km mogu se ekstrudirati u jednom proizvodnom ciklusu. Produženi vremenski periodi ekstruzije zahtijevaju besprijekorno opskrbljivanje granulama smole u uvjetima izuzetne čistoće. U vrhunskim postrojenjima za ekstruziju kabela postoje zatvoreni sustavi za rukovanje granulama kako bi se izbjegao svaki kontakt s zrakom unutar postrojenja ili s ljudskim rukama.

Svaki prekid u procesu rezultira prekidom kabela, što rezultira kraćim duljinama kabela nego što je prvobitno planirano.

Duljine ekstruzije, bilo da su ograničene kapacitetima ekstrudera ili su posljedica nepredvidivih prekida kabela, mogu se povezati koristeći fleksibilne tvorničke spojeve kako bi se postigle velike isporučene duljine. Ovi fleksibilni tvornički spojevi uključuju vodičku vezu, primjenjujući jedan od već opisanih tipova spojeva. Spoj vodiča mora biti u ravnini s površinom kabela. Nakon što se vodički spoj izvede, izolacija na susjednim krajevima kabela postupno se sužava. Prostor između

spojenih dijelova popunjava se papirom preko kojeg se nanosi XLPE traka, a zatim se cijeli spoj stvrdnjava pod utjecajem topline i pritiska. Dodatni izolacijski materijal istopi se i veže sa površinom postupno sušene izolacije kabela. Slika 4.2. prikazuje takav fleksibilni tvornički spoj. Neki proizvođači koriste spojeve koji su izrađeni postupkom injekcijskog prešanja. Fleksibilnost spoja ima ključan značaj za daljnji put kabela kroz kableske mostove tvornice.



Slika 4.2. Tvornički spoj ekstrudirane kableske jezgre (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]

Plinoviti nusprodukti koji su otopljeni u XLPE matrici moraju biti uklonjeni putem procesa degažiranja. Nepravilno provedeno degažiranje može dovesti do toga da kabeli, tijekom kasnijeg rada, emitiraju te plinove, rezultiraju nepoželjnim akumulacijama plina unutar vodiča ili ispod olovnog omotača. Degažiranje dugih dužina jezgri podvodnih kabela zahtijeva velike grijane spremnike koji su dobro prozračeni.

Izolacijski materijal mora biti zaštićen od vlage već unutar same tvornice. Kondenzacijska voda može se formirati na hladnim granulama smole koje dolaze iz transporta. Na površinama gdje se kabel reže, vlaga može prodrijeti u vodič i unutarne kontaminirati izolaciju. QA (Quality Assurance) sustav proizvođača određuje kada i gdje tijekom skladištenja kabela treba koristiti odgovarajuće čepove na krajevima kako bi se spriječilo unošenje vlage.

#### 4.1.3. Kabeli sa izolacijom od papira

Proces nanošenja papirne izolacije odvija se na specijaliziranim linijama za ovu svrhu, koje se sastoje od niza namatajućih glava. Svaka glava za nanošenje papira obično omotava 12-16 slojeva papirnih traka oko kabela vodiča dok prolazi kroz proces.

Papirne trake nanose se prema složenom uzorku. Svaka pojedinačna papirna traka omata se oko kabela u otvorenoj spirali, bez preklapanja u narednim namotajima. Između uzastopnih namotaja postoji mali razmak, nazvan "butt gap" (udaljenost između krajeva trake). Kada se kabel savija, "butt gapovi" na unutarnjoj strani omogućuju relativno kretanje pojedinačnih papirnih traka.



Slika 4.3. Nanošenje ugljen-crne papirnate trake i izolacijskog papira na bakreni vodič (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]

Napetost papira kontrolira se za svaku traku putem kočionih uređaja na svakom namotaju. Glave za nanošenje papira rotiraju u mijenjajućim smjerovima kako bi se postigla ravnoteža okretnog momenta potrebnog za izolaciju. Slika 4.3. prikazuje jezgru kabela unutar glave za nanošenje papira. Prije nanošenja izolacijskog papira, na vodič se nanosi sloj poluvodičkog papira s dodatkom ugljenog pigmenta. Visokoučinkoviti energetski kabeli zahtijevaju upotrebu prethodno osušenog kablenskog papira i liniju za nanošenje papira koja je smještena u kontroliranoj suhoj atmosferi.

Mnoge vrste kabela koriste različite debljine papira tijekom procesa izolacije, pri čemu svaki sloj ima točno definiranu napetost papira. Debljina papira može varirati između 40  $\mu\text{m}$  i 180  $\mu\text{m}$ . Sam proces izolacije može uključivati i do 270 pojedinačnih papirnih traka koje se nanose na vodič tijekom jednog postupka.

Postupak nanošenja papira može se zaustaviti i pokrenuti prema potrebi. Ponovno postavljanje namotaja papira ima značajan utjecaj na ukupno vrijeme proizvodnje i zahtijeva znatne logističke napore kako bi se osiguralo dovoljno namota odgovarajućeg tipa papira.

Nakon završetka procesa izolacije, uključujući zaštitni ekran, jezgra kabela se usmjerava prema okretnom stolu za prijem. To može biti privremeni okretni stol ili jezgra kabela se izravno pohranjuje u rotirajući spremnik za impregnaciju. Bez obzira na odabir, održavanje kabela u suhom okruženju iznimno je važno.

Kroz stečeno iskustvo tijekom godina i dosljedno pridržavanje strogih standarda kvalitete, moguće je postići čvrstu i ravnomjernu izolaciju bez nabora ili preklopa, čak i na izuzetno dugim dužinama kabela. Ovaj proces praktično nema ograničenja, jer se sljedeći dio vodiča može spojiti sa prethodnim prije nego što prođe kroz liniju za nanošenje papira. Jedini limit za neprekidnu duljinu kabela s nanošenom izolacijom je kapacitet prijemnog okretnog stola.

Iako je papir u ravnoteži s atmosferom obično sadržava 6-12% vlage, prihvaćeni nivo vlage za papirnatu izolaciju iznosi samo 1-2%. Stoga je neophodno sušenje nanosa papira prije impregnacije. Današnji vodeći proizvođači kabela posjeduju velike sušionice koji omogućuju obradu kabela jezgre duljine do 50 km odjednom.

Nakon što je nanošenje papira završeno, kabel se stavlja u spremnik za impregnaciju. Zatim se poklopac zatvara, a kabel prolazi kroz proces grijanja i vakuumiranja kao završni korak sušenja.

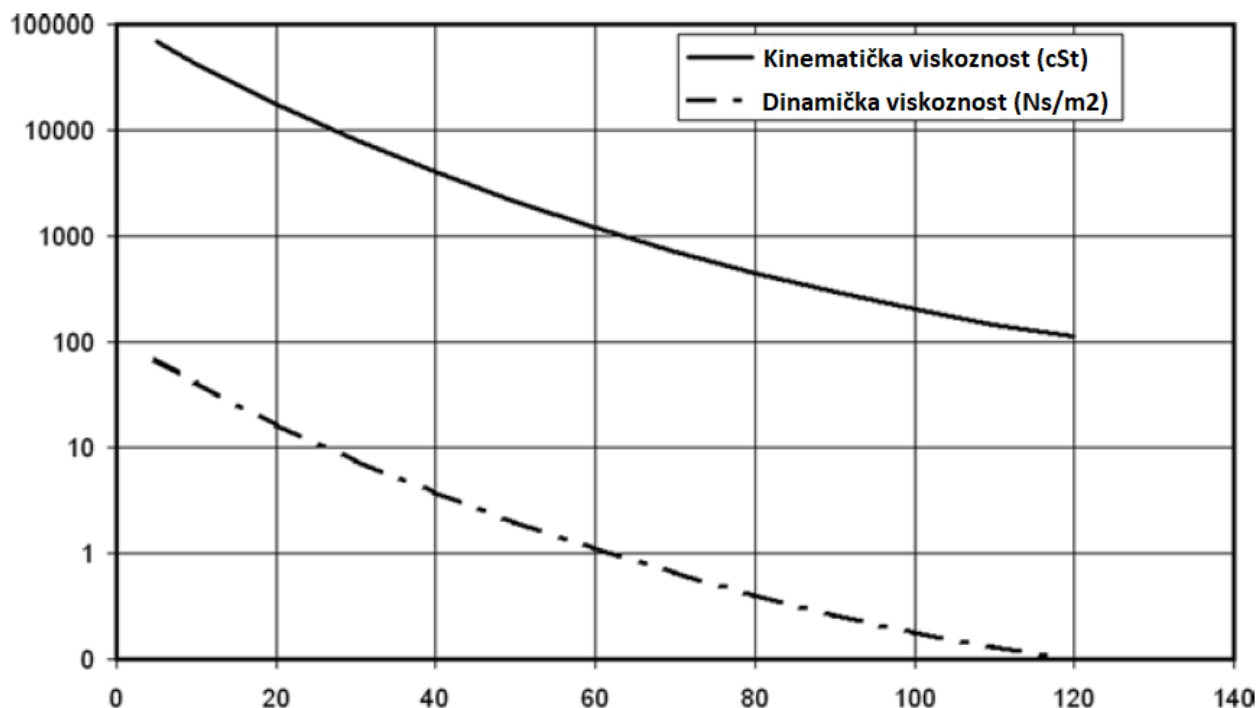
Dosad je proces jednak za kabele s masenom impregnacijom i kabele s LPOF izolacijom. Međutim, naknadni postupci impregnacije i oblaganja razlikuju se ovisno o viskoznosti impregnanta.

Impregnacijski spoj za kabele s masenom impregnacijom, koji se često koriste za HVDC kabele, postaje prilično tekuć pri temperaturi impregnacije od 120°C (vidi Sliku 4.4.). Ovaj spoj se zagrijava i degazira u posebnom postrojenju za tretiranje ulja prije nego što se ubrizgava u zatvoreni spremnik za impregnaciju. Spremnik se potpuno napuni pod pritiskom. Zbog niske viskoznosti vrućeg spoja, impregnacija se završava unutar nekoliko dana. Međutim, kabel se ne može odmah dalje obrađivati.

Hlađenje kabela s masenom impregnacijom zahtijeva pažljivu kontrolu jer se skupljanje spoja u izolaciji mora kompenzirati novim spojem iz preostalog volumena spremnika. Kako temperatura pada, viskoznost spoja raste, što usporava proces nadopunjavanja. Ako se kabel prerano izvadi iz olovnog omotača, hlađenje može izazvati stvaranje praznina u izolaciji. Hlađenje kabela s masenom impregnacijom može potrajati nekoliko tjedana.



Nakon postizanja kriterija za hlađenje, poklopac spremnika se podiže, a kabel pažljivo prenosi na stroj za armiranje olovnom omotačem. Kratkotrajni kontakt s okolišem neće oštetiti izolaciju kabela, jer viskoznost spoja sprečava difuziju topljivog dušika ili vlage u izolaciju.



Slika 4.4. Viskoznost u odnosu na temperaturu impregnacijske mase HVDC kabela [15]

Y-os predstavlja viskoznost, X-os predstavlja temperaturu u °C

Kabeli s LPOF (ili SCFF) izolacijom impregnirat će se s vrlo niskoviskozičnim mineralnim uljem ili sintetičkim impregnacijskim tekućinama. Prije nego što se tekućina pumpa u spremnik kako bi natopila osušenu jezgru kabela, ona će se degazirati i pripremiti. Zahvaljujući niskoj viskoznosti, postupak impregnacije i hlađenja bit će znatno brži nego kod kabela s masenom impregnacijom.

Impregnirana jezgra kabela, kod kabela s izolacijom od papira ispunjenim uljem neće se moći prenositi iz spremnika za impregnaciju do stroja za nanošenje olovnog omotača na otvorenom zraku. To je zato što nisko viskozno ulje brzo apsorbira vlagu iz zraka. Umjesto toga, koristit će se cijev ispunjena uljem koja će nositi izolirani vodič ispod razine ulja u spremniku za impregnaciju. Nakon toga će preći preko ruba i ući u stroj za nanošenje olovnog omotača. Cijev će se neprestano ispirati degaziranim impregnacijskim uljem kako bi se osigurala čistoća i kvaliteta procesa.

#### 4.1.4. Oblaganje

Većina podmorskih energetske kabela ima radijalnu vodonepropusnu barijeru u obliku metalne oplata. Kada su u pitanju kraći kabeli srednjeg napona, često se koristi aluminijski laminat kao oplata. Ovaj laminat sastoji se od aluminijske folije koja je presvučena slojem termoplastike. Aluminijski laminat se uzdužno presavija oko jezgre kabela i zalijepi zajedno, ponekad uz Z-preklop. Naknadna plastična oplata dodatno pruža mehaničku podršku laminatu i cjelokupnom kabeu.

Olovna oplata za podmorske energetske kabele nanosi se u ujednačenoj debljini između 2 i 5 mm pomoću olovne preše ili ekstrudera. U olovnoj preši, koja se također naziva hidraulična preša, rastopljeno olovo se puni u komoru i hladi na ispravnu temperaturu ispod točke topljenja. Zatim se hidrauličkom silom pritisne kroz matricu, oblikujući bešavnu cijev oko kabela koji se polako kreće kroz prešu. Proces se zaustavlja kada se komora za olovo isprazni, te se ponovno puni rastopljenim olovom. Ovaj prekidni proces dovodi do promjena u oplati kabela svaki put kad se preša zaustavi. [14]

Drugi uređaj za nanošenje olovne oplata je kontinuirani olovni ekstruder Hansson-Robertson, koji je prvi put komercijaliziran 1949. godine. Osnovna ideja je vijčani ekstruder napajan olovom iz ljevaonice. Današnji Hansson-Robertson ekstruderi mogu pružiti neprekidnu proizvodnju olovnih oplata duljine od 50 km i više s visokom kvalitetom. Kontinuirani ekstruderi su postali dominantna tehnologija zbog svoje učinkovitosti i ekonomske isplativosti u proizvodnji olovnih energetske kabela.

Različite tehnologije za nanošenje olovne oplata za podmorske energetske kabele zahtijevaju specifične legure olova kako bi se postigle optimalne performanse i stabilnost procesa. Odabir odgovarajuće legure olova ključan je faktor za postizanje visoke kvalitete i trajnosti olovnih oplata.

Različite legure olova mogu imati različite fizikalne i kemijske karakteristike, kao i svojstva topljenja, koja odgovaraju specifičnim uvjetima procesa. Na primjer, legure olova koje se koriste za hidraulične preše mogu imati različitu viskoznost pri određenim temperaturama kako bi se olakšalo proces pritiskanja i oblikovanja oplata. S druge strane, legure olova koje se koriste za vijčane ekstrudere moraju imati odgovarajuće svojstvo tijekom ekstruzije i hlađenja.

Karakteristike legura olova također mogu utjecati na mehaničku čvrstoću, otpornost na koroziju i druge performanse olovnih oplata. Stoga je važno temeljito istražiti i razumjeti svojstva različitih legura olova kako bi se postigla optimalna proizvodnja i kvaliteta oplata za podmorske energetske kabele.

Upotrebom dodataka kao što su antimoni, kositra, bakar, kalcij, kadmij, telur i drugi, moguće je značajno unaprijediti dugoročnu stabilnost te svojstva rastezanja i ekstruzije legura olova. Standard EN 50307 pruža popis raznih legura olova namijenjenih za primjenu u kabelima. Ovi aditivi poboljšavaju različite karakteristike olova, uključujući njegovu čvrstoću, rastezljivost, otpornost na koroziju i druge performanse. Točna kombinacija elemenata ovisi o zahtjevima procesa i finalnih karakteristika proizvoda.

Kako bi se osigurala zaštita olovne oplata od mehaničkih oštećenja, preporučuje se dodavanje dodatnih zaštitnih slojeva što je prije moguće. Primjena kontinuiranog olovno-ekstrudera omogućuje dodavanje čvrstog plastičnog zaštitnog sloja tijekom istog postupka, odmah nakon ekstrudiranja olova. Kod postupaka koji koriste hidraulične preše s prekidnim radom, kabel se privremeno pohranjuje na okretnom stolu prije nego što se plastika zaštitnog sloja nanese u sljedećem koraku. Ovaj zaštitni sloj pruža dodatnu mehaničku podršku olovnoj oplati, štiteći je od potencijalnih oštećenja tijekom rukovanja, transporta i instalacije.

Za privremeno pohranjivanje kabela u običnoj olovnoj oplati, korisno je premazati oplatu bitumenskom otopinom. Ovaj premaz sprječava da se olovne oplata zalijepe jedna za drugu tijekom skladištenja. Bitumenska otopina stvara zaštitni sloj između oplata, omogućavajući jednostavnije rukovanje kabelom te sprječava da se oplata nepoželjno spoje ili oštete tijekom pohrane. Ova mjera dodatno osigurava integritet kabela dok je pohranjen u olovnoj oplati.

Iako je teoretski moguće stvarati aluminijske oplata putem ekstruzije ili zavarivanjem traka, ovaj materijal se rijetko koristi za podmorske kabele zbog svoje loše otpornosti na koroziju. Umjesto toga, za izradu oplata se često koristi bakar. Bakrena traka se presavija uzdužno oko kabela, a rubovi se redovito režu i zavaruju kako bi se formirala oplata. Nakon ovog procesa, oblikovana bakrena cijev se može urezati kako bi se povećala fleksibilnost oplata. Međutim, primjena ove metode se obično ograničava na kraće duljine kabela, često oko kilometra.

Budući da je stvaranje savršenog zavarenog spoja ključno za osiguranje vodonepropusnosti bakrene oplata, taj se spoj često procjenjuje u stvarnom vremenu nakon zavarivanja. To se često

postiže korištenjem različitih metoda, uključujući mjerenje struje vrtložnih struja ili drugih tehnikama koje omogućuju detekciju potencijalnih problema ili nedostataka u zavarenom spoju.

#### 4.1.5. Postavljanje

Za proizvodnju trofaznih kabela, potrebno je spojiti tri kabela jezgre kako bi se stvorio koherentan kabel. Jednostavno spajanje tri jezgre paralelno u zajedničku oplatu rezultiralo bi vrlo krutom konstrukcijom bez potrebne fleksibilnosti. U tu svrhu koriste se strojevi za horizontalnu složenost koji obično imaju tri ili više bubnjeva za izvlačenje, svaki sadrži po jednu kabelsku jezgru, te dodatni bubanj za prihvat koji će primiti složeni kabel.

Proces horizontalne složenosti odvija se na sljedeći način: Kabela jezgre prolaze kroz zajednički umetak gdje se povezuju i osiguravaju pomoću trake za vezivanje. Zatim se bubanj za prihvat postavlja u uvijač bubnjeva koji vrti osu bubnja oko osi kabela dok se bubanj za prihvat okreće i prihvaća trožilni kabel. Tijekom ovog procesa, uvijač bubnja i bubnjevi za izvlačenje rotiraju kako bi se postigao obrnuti pokret koji je potreban da bi se tri kabela jezgre održale zajedno i pravilno spojile.

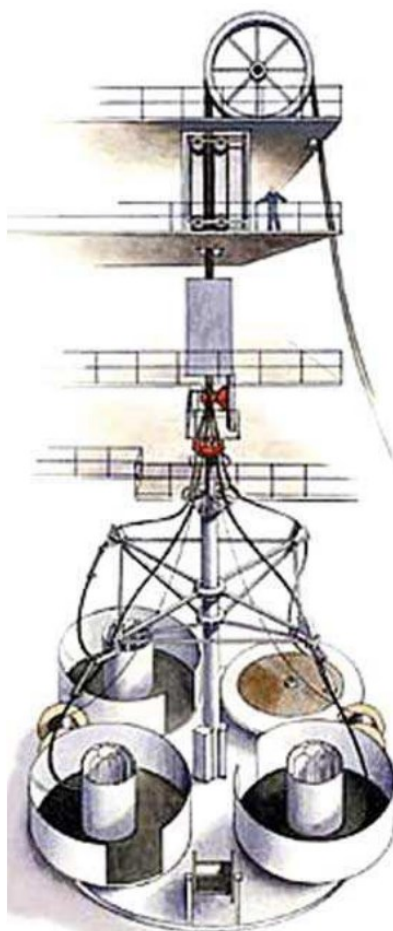
Ovaj postupak sličan je onome koji se koristi prilikom izrade užadi i omogućuje stvaranje fleksibilnih i koherentnih trofaznih kabela, osiguravajući da se kabela jezgre čvrsto povežu i drže zajedno unutar zajedničkog omotača.

Ova metoda je dovoljna za kratke kabele koji će se isporučiti na bubnjevima (vjerojatno duljine manje od 1000 metara po dužini). Za dulje podmorske kabele bilo bi nepraktično proizvoditi kabele u duljinama na bubnjevima, a zatim ih spajati kako bi se postigle isporučene duljine od 20–40 km. Duge duljine trofaznih podmorskih kabela mogu se proizvesti pomoću strojeva za uspravnu složenost. Bubnjevi za izvlačenje (bubnjevi ili košare) postavljeni su na okretnu ploču koja se okreće oko okomite osi. Kabela jezgre usmjeravaju se vertikalno prema gore u sakupljački umetak mnogo metara iznad središta okretne ploče. Kabela jezgre prolaze kroz umetak, zatim preko vretena, a potom se stavljaju na okretnu ploču za izvlačenje. Slika 4.5. prikazuje stroj za uspravnu složenost s rotirajućim košarama za izvlačenje.

Košare za kabela jezgre mogu primiti nekoliko kilometara kabela jezgri, ovisno o promjeru jezgre i veličini košare. Kada se košare isprazne, ponovno se pune sljedećom kabelskom jezgrom, koja se povezuje s prethodnim kabelskim jezgrama pomoću fleksibilnih tvorničkih spojeva.

Okretna ploča koja nosi košare također može nositi dodatne košare ili bubnjeve za optičke kabele i/ili punila, koja bi se smjestila u prostore između kabljskih jezgri. Strojevi za uspravnu složenost kabela su najuniverzalniji strojevi za složenost.

SZ-složenost (suprotna složenost) je alternativna metoda složenosti trofaznih podmorskih kabela koja se koristi kako bi se prevladali neki problemi povezani s klasičnom trofaznom složenošću. U SZ-složenosti, smjer složenosti (lijevo ili desno) redovito se mijenja tijekom postupka složenosti. Ovaj pristup omogućuje ravnomjernu raspodjelu stresa i smanjuje tendenciju uvijanja kabela tijekom instalacije. Osim toga, SZ-složenost ne zahtijeva upotrebu uvijača bubnjeva ili rotirajućih bubnjeva za izvlačenje, što može pojednostaviti proizvodni proces i smanjiti potencijalne probleme povezane s njihovom upotrebom.



Slika 4.5. Vertikalni stroj za uspravno slaganje s tri rotirajuće košare za izvlačenje i četvrtim rotirajućim nosačem za optički kabel. Dodatni mali bubnjevi mogu primiti punila. (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]

Ako je promjer svake pojedinačne kabljske jezgre označen kao "d", tada će promjer obručne kružnice oko trožilnog kabela biti 2.16 puta veći od "d". Ovo omjerom možete postići ravnotežu

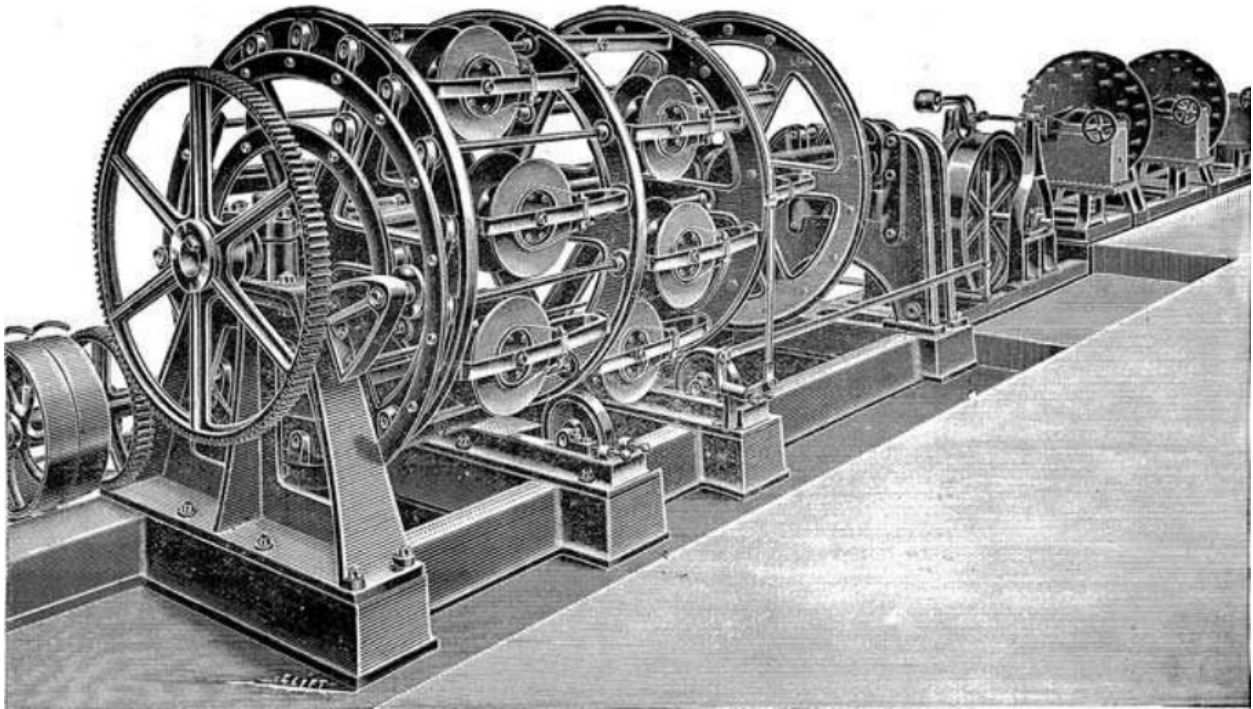
između kompaktnosti i fleksibilnosti kabela te osigurati adekvatnu zaštitu i prostor za trožilnu strukturu kabela.

#### 4.1.6. Armatura

Glavna karakteristika podmorskih energetske kabela ističe se kroz proces armiranja. Bit koncepcije podmorskog kabela s armaturom jest namatanje metalnih žica oko pojedinačne jezgre ili višezilnog kabela. Često korištena žica za armiranje je pocinčana čelična žica, dok se povremeno primjenjuju i bakrene, mjedene, brončane te aluminijske žice.

Ilustracija prikazana na slici 4.6. vizualno prikazuje osnovno načelo armiranje bolje od većine fotografija [16]. Današnji strojevi za armiranje zadržavaju sličan koncept, uz integraciju elektroničkih pogona i računalno nadzorne opreme. Ovi strojevi sadrže niz kolutova sa žicom postavljenih na rotirajući kavez. Središnja os stroja za armiranje omogućuje prolazak kabela kroz uređaj. Dok se kavez okreće, žice se postupno odmotavaju s kolutova i organizirano slažu unutar skupljajuće matrice koja ima oblik zvona na izlazu iz stroja za armiranje. Unutar matrice, žice se pažljivo polažu oko središnjeg kabela. Precizno usklađivanje brzine rotacije stroja i brzine kretanja kabela ključno je kako bi se osigurala točna duljina polaganja.

U određenim sustavima za proizvodnju podmorskih kabela, može se susresti dvostruko armiranje postavljanjem dva stroja za armiranje jedan za drugim. To često rezultira u podmorskim kabelima s dvostrukom armaturom, često postavljenim u suprotnim smjerovima radi dodatne zaštite.



*Slika 4.6. Stroj za armiranje s planetarnim kretanjem bobina žice. Vidljivo je šest kolutova podijeljenih u dvije skupine. Ekscentrični prsten ispred prvog ruba održava sve kolutove u istoj orijentaciji tijekom njihove rotacije ( Stroj je dizajniran, osmišljen i proizveden od strane Johnson & Phillips, London) [16]*

U čvrstim strojevima za armiranje, osovine kolutova su čvrsto postavljene unutar okvira kaveza. To znači da se osovine rotiraju zajedno s kavezom. Svaka žica koja se koristi za armiranje dobiva jedan puni krug ( $360^\circ$ ) svaki put kad se kavez rotira. Ovaj proces može predstavljati izazov, posebno kada se koriste teške žice i kada je duljina polaganja kratka.

U mnogim velikim strojevima za armiranje, kolutovi su vođeni planetarnim zupčanicima kako bi se osiguralo da zadrže istu globalnu orijentaciju dok se kreću oko kabela (vidi Slika 4.6.). Ovo osigurava da žice za armiranje ne dobivaju dodatni okret dok se polažu oko kabela. Međutim, kada se koriste ravne žice za armiranje, nije uvijek poželjno da stroj za armiranje ima planetarno kretanje. U nekim strojevima za armiranje, planetarno kretanje može biti omogućeno ili isključeno prema potrebi.

Svaki kolut na stroju ima uređaj za zaustavljanje koji osigurava da žice ostanu ravne i omogućava glatko polaganje na jezgru kabela. Ovaj uređaj za zaustavljanje osigurava da žice ne dobiju nepotrebni vrtni moment dok se polažu, čime se postiže preciznost i kvaliteta u procesu armiranja kabela.

Gusjenice kabela ili drugi linearni kabelski uređaji postavljeni nizvodno služe za povlačenje kabela kroz stroj za armiranje. Ovaj postupak zahtijeva značajne vučne sile kako bi se kabel izvukao iz stroja za armiranje, s obzirom na potrebu za omatanjem velikog broja žica za armiranje s kolutova oko samog kabela. U slučaju velikih armiranih kabela, vučna sila koja je potrebna može doseći i preko 5 tona ili više.

Ovaj zahtjev za jakom vučnom silom proizlazi iz činjenice da je proces armiranje složen i zahtijeva precizno postavljanje i prijanjanje žica oko kabela. Kako bi se postigla pouzdanost i kvaliteta armiranja, potrebno je osigurati da se žice pravilno i ravnomjerno namotavaju na kabel. Osim toga, fizičke karakteristike žica, duljina polaganja, promjer kabela i drugi faktori također igraju ulogu u određivanju potrebne vučne sile.

Ovaj značajan napor vuče ima za cilj osigurati da se armiranje pravilno formira i čvrsto prijanja uz kabel, što je ključno za osiguranje mehaničke čvrstoće i elektromagnetske zaštite koju pruža armiranje.

Duljina polaganja armature određuje se proporcionalnim omjerom brzine prolaska kabela kroz stroj i brzine rotacije kaveza. Prijenosnik omogućuje mehaničko povezivanje pogonskog uređaja za vuču s pogonom za rotaciju. Suvremeni uređaji za armiranje koriste elektroničke pogone istosmjernog tijeka kako bi postigli visoku preciznost u postizanju željene duljine polaganja.

Veliki strojevi za armiranje podmorskih kabela često su opremljeni s dva uzastopna rotirajuća kaveza. U slučaju vrlo velikih podmorskih energetskih kabela, ova dva kaveza se koriste zajedno kako bi se omogućilo potpuno armiranje kabela slojem žica. Oba kaveza se okreću u istom smjeru te imaju istu duljinu polaganja, što omogućuje kombiniranje žica u jedan sloj.

Za postizanje dvostrukog sloja jednosmjerne armature, kavezi se okreću različitim brzinama kako bi se postigli slojevi s različitim duljinama polaganja. Alternativno, dvostruka slojna obrnuta armatura postiže se tako da se kavezi okreću u suprotnim smjerovima rotacije. Ova metoda je češća i omogućuje učinkovitije stvaranje dvostrukog sloja armature s obrnutim uzorkom.

Tijek procesa armiranja zahtijeva povremene stanke kako bi se zamijenili prazni kolutovi sa punima. Novi segmenti žica se pričvršćuju na krajeve prethodnih segmenta putem zavarivanja. Ovaj postupak je brz i efikasan, a završava se i postupkom glačanja oštih rubova te cinkanjem



zavarenih spojeva. Izmjena svih kolutova unutar kaveza stroja odjednom ima prednost smanjenja ukupnog vremena zastoja.

Za kabele namijenjene većim dubinama, razmatra se mogućnost produženja varova na veću udaljenost kako bi se osigurala pouzdanost i izdržljivost armiranja.

U procesu armiranja, jedan ili više kolutova može sadržavati optičke vlaknaste (OF) kabele, koji se integriraju unutar energetskog kabela. OF kabeli su osjetljiviji u usporedbi s robusnim čeličnim žicama, stoga zahtijevaju pažljiviji pristup. Za njihovu obradu, nužni su sofisticirani uređaji za zaustavljanje procesa te nježnije unutarnje vođenje unutar stroja za armiranje kako bi se osigurala njihova integritet.

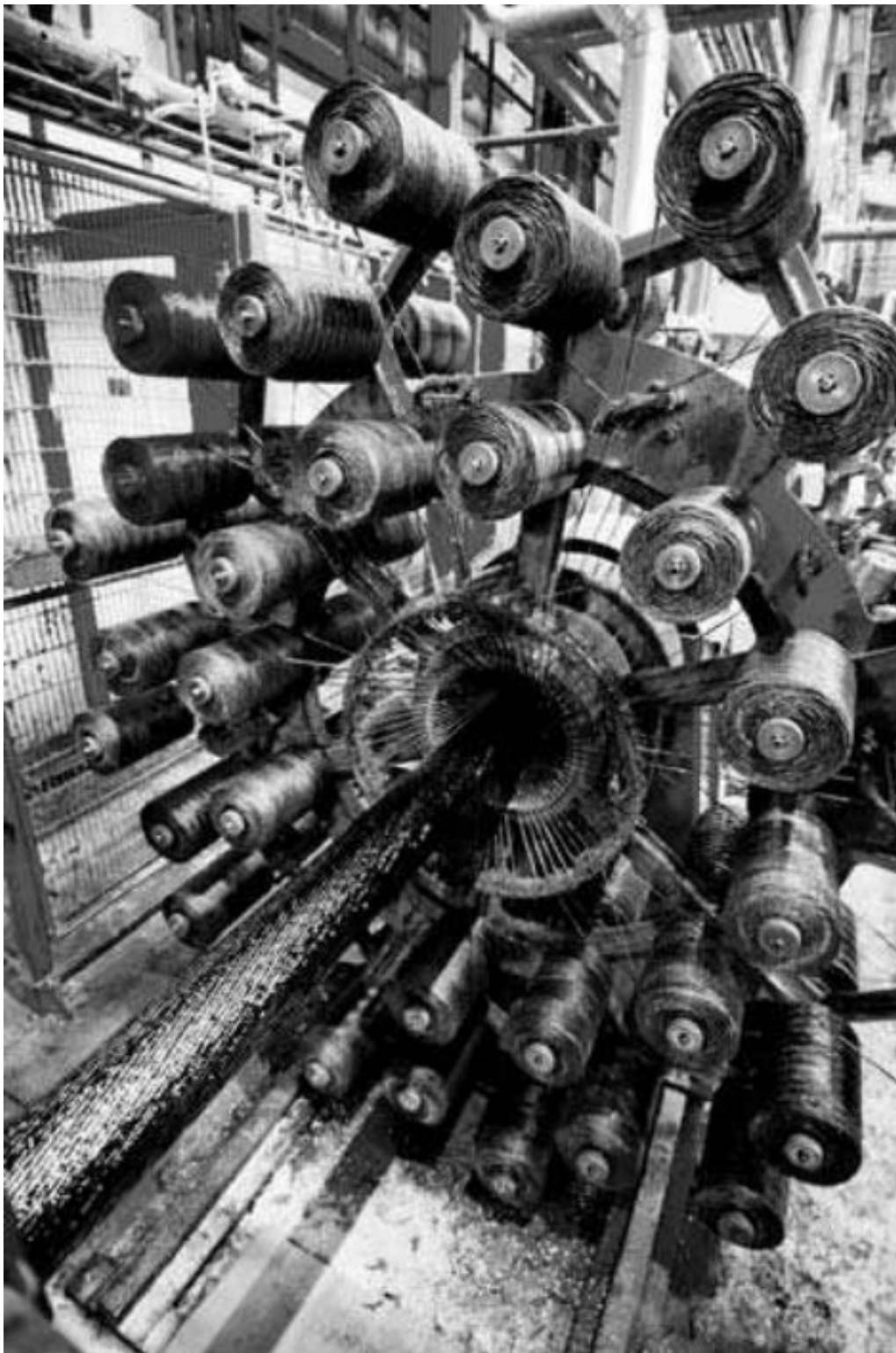
Na početku procesa armiranja, često se koriste jedinice za namatanje traka smještene na ulazu u stroj kako bi se aplicirale trake za podlogu. Dodatno, često se primjenjuju i metalne trake ispod žica koje se koriste za armiranje. Ove metalne trake pružaju dodatnu čvrstoću i pritisak, posebno za kabele s izolacijom od papira ili u situacijama gdje je potrebna dodatna zaštita od vanjskih čimbenika.

Za očuvanje integriteta armature i sprečavanje korozije često se primjenjuju slične metode zaštite. Uobičajeni način zaštite armiranja od korozije uključuje korištenje fluidnog bitumena. Zagrijani bitumen se raspršuje preko žica za armiranje neposredno prije nego što se one skupljaju u matricu, te se postupak ponavlja nakon matrice. Na ovaj način, žice su potpuno prekrivene slojem bitumena sa svih strana.

Važno je napomenuti da se protok bitumena mora prekinuti kad se stroj za armiranje zaustavi radi zamjene žica ili drugih održavanja, kako bi se izbjeglo pregrijavanje kabela zbog kontinuiranog nanošenja bitumena.

Na završetku procesa, preko žica za armiranje se namata vanjski sloj polipropilenskih niti (konaca) - jedan sloj se namata desno, a drugi sloj lijevo. Okretni stalak za kolutove niti, koji je prikazan na slici 4.7., koristi se za ovu svrhu. Armirani kabel, koji je već prošao kroz postupak bitumenske zaštite, ulazi u središnji otvor. Niti za polipropilenski sloj uranjaju u ljepljivi bitumen kako bi se osigurala prijanjanje.

Bitumen ispod vanjskog sloja, ako je prisutan, treba nanositi pažljivo kako bi se izbjeglo curenje kabela tijekom skladištenja i polaganja. To znači da se sloj bitumena ispod vanjskog polipropilenskog sloja nanosi u ograničenim količinama kako bi se spriječilo neželjeno izlivanje tijekom transporta i instalacije kabela.



Slika 4.7. *Namatanje polipropilenske niti na armirani kabel prekriven vrućim bitumenom (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]*

## 4.2. Skladištenje podmorskih kabela

Skladištenje podmorskih kabela velike težine zahtijeva pažljivo planiranje i pridržavanje određenih smjernica kako bi se osigurala sigurnost proizvoda i okoliša. S obzirom na situaciju gdje nemate sposobnost podizanja cijelog opterećenja, morat ćete primijeniti inovativne metode i tehnike za skladištenje.

Kabelski bubnjevi omogućuju skladištenje znatnih duljina armiranih podmorskih kabela, s kapacitetom nekoliko stotina metara do čak 1–2 km za veće bubnjeve. Ova tehnika pohrane posebno je korisna za terenske kabele koje se koriste u projektima vjetroelektrana na moru, kraće obalne kabele te ograničene prijelaze preko vodenih površina.

Kabelski bubnjevi koji sadrže armirane kabele mogu biti znatne mase, obično između 30 i 50 tona. Stoga zahtijevaju prikladnu opremu za dizanje i prijevoz, te stabilne prometnice ili puteve za nesmetan transport.

Za dulje duljine, koriste se okretni stolovi ili fiksne podloge za namatanje. Podloga za namatanje je ravna, kružna ili ovalna površina smještena unutar postrojenja tvornice ili u spremniku za pohranu na brodu kabela. Kabel se sa povišene pozicije vodi na podlogu, često uz pomoć linearnog kabelskog uređaja (vidi sliku 4.8).

Za obradu duljih kabela koriste se rotirajući stolovi ili nepomične platforme za namatanje. Nepomična platforma za namatanje je ravan, često kružnog ili ovalnog oblika, smještena unutar postrojenja tvornice ili unutar spremnika na brodu predviđenog za pohranu kabela. Kabel se s više elevirane točke postavlja na ovu platformu, često koristeći linearni kabelski uređaj kako bi se olakšalo vođenje kabela (pogledaj sliku 4.8).



Slika 4.8. *Namatanje podmorskog energetskeg kabela* [13]

Za namatanje armiranog kabela je moguće samo ako je armiranje usmjereno u jednom smjeru. Svako okretanje kabela oko podloge za namatanje uzrokuje  $360^\circ$  okretanja kabela. Zbog toga je potreban minimalni promjer podloge za namatanje kako bi kabel mogao podnijeti rotaciju koja se javlja pri svakom okretanju. Minimalni promjer podloge za namatanje trebao bi biti najmanje 60 puta veći od promjera kabela [17]. Točan minimalni promjer podloge za namatanje ovisi o duljini armiranog dijela kabela, razmaku između žica i drugim tehničkim parametrima.

Kabel koji je obložen sa armaturom koje ima usmjerenu strukturu (jednoslojno ili dvostruko s istim smjerom namatanja) može podnijeti samo torziju u određenom smjeru. Namatanje je moguće samo ako se kabel okreće u smjeru u kojem se armatura otvara. Ako bi se kabel namatao u suprotnom smjeru, došlo bi do savijanja i petljanja kabela, što bi rezultiralo neuspjehom postupka.

Primjerice, za kabel postavljen u S - obliku, poput S-lay kabela, smjer namatanja mora biti u smjeru kazaljke na satu. Pod tim smjerom, armiranje se može nježno otvoriti pod utjecajem rotacije kabela. Odabir pogrešnog smjera namatanja (u suprotnom smjeru za kabel s armiranim žicama postavljenim u obliku slova S) rezultirao bi zatvaranjem armaturnih žica. To bi moglo dovesti do stvaranja nabora ili petlji u kabelu.

Važno je napomenuti da postoje iznimke od ovog pravila. Na primjer, trožilni kabeli s armiranjem od jedne žice i s jezgrom kabela postavljenim u suprotnom smjeru mogu se polagati u suprotnom smjeru (usp. Tablica 4.1.).

Tablica 4.1. *Smjer namatanja ovisno o usmjerenju sloja armature* [13]

Vrsta kabela	Usmjerenje sloja armature	Smjer namatanja
Jednožilni kabeli s jednosmjernom armaturom	S - namatanje	U smjeru kazaljke na satu
Jednožilni kabeli s obrnutim namatanjem (dva namotaja) armature	S ili Z - namatanje	Bez namatanja
Trožilni kabeli s žilom jednostrano namotanom armaturom, žile namotane u S orijentaciju	S - namatanje	U smjeru kazaljke na satu
Trožilni kabeli s žilom jednostrano namotanom armaturom, žile namotane u Z orijentaciju	S - namatanje	U smjeru kazaljke na satu ili suprotno od smjera kazaljke na satu

Podloga za namatanje trebala bi biti ravna i opremljena visokom ogradom koja osigurava zaštitu osoba koje se kreću oko područja namatanja. Ova ograda služi i kao smjernica za pravilan položaj kabela. Kabel se dovodi na područje namatanja s visine od otprilike 6 - 15 metara iznad samog mjesta namatanja. Poželjno je da se na vrhu nalazi gusjeničar ili motorizirani kotač kako bi se olakšalo vođenje kabela. Slika 4.8 prikazuje primjer ograde koja okružuje podlogu za namatanje, uz pet osoba koje provode postupak namatanja. Kvadrant (luk vodiča za valjke) suspendiran je s dizalice i uključuje par kotača koji služe za vuču kabela.

Izloženost direktnim sunčevim zrakama na pohranjenim kabelima može rezultirati visokim temperaturama koje mogu uzrokovati neželjeno istjecanje bitumena.

Kabeli koji se drže na podlogama za namatanje, vanjskim okretnim stolovima, prikolicama ili brodovima za polaganje kabela često su izloženi raznim vremenskim uvjetima kao što su kiša, morska voda prskanje, i slično. U ovakvim situacijama, važno je osigurati da krajevi kabela budu zaštićeni odgovarajućim zaštitnim kapicama za kraj, prema preporukama dobavljača kabela. U većini slučajeva, nije preporučljivo koristiti zaštitne kapice koje se postavljaju termičkim procesom, već se preporučuju druge metode zaštite.

### **4.3. Projektiranje trase**

Projektiranje trase za polaganje podvodnih kabela predstavlja duboko složen proces koji zahtjeva sveobuhvatno istraživanje, precizno planiranje i multidisciplinarnu ekspertizu kako bi se osigurala ne samo tehnička izvedivost, već i očuvanje okoliša, ekonomska učinkovitost te dugoročna održivost. Ovaj proces prepliće tehničke, ekološke i regulatorne aspekte kako bi se postigao harmoničan balans između tehnološkog napretka i zaštite prirode.

Prvi korak u projektiranju trase je jasno definiranje svrhe podvodnih kabela. Ovisno o namjeni, kao što su komunikacijske mreže, prijenos energije ili znanstvena istraživanja, zahtjevi se razlikuju, uključujući kapacitete, brzine prijenosa i energetske karakteristike. Ovi faktori igraju ključnu ulogu u odabiru odgovarajućeg tipa kabela i tehničkih specifikacija.

Nakon toga, slijedi dubinska analiza morskog okoliša kroz geotehničke i hidrografske studije. Te analize obuhvaćaju dubinu mora, karakteristike morskog dna, prisutnost podvodnih prepreka poput korala i rizike povezane s morskim strujama i vremenskim uvjetima. Ovi podaci pružaju ključne informacije za optimalno pozicioniranje kabela, minimizirajući rizike i potencijalne utjecaje.

Ekološka osjetljivost igra neizostavnu ulogu u projektiranju trase. Zaštita podvodnog okoliša, uključujući morske ekosustave i kulturnu baštinu, zahtijeva precizno izbjegavanje osjetljivih područja. Stručnjaci moraju pažljivo analizirati morske karte i prikupiti podatke o biološkim raznolikosti kako bi definirali trasu koja će minimalno narušiti prirodni svijet.

Dubina mora također utječe na tehnički dizajn trase. Različite dubine zahtijevaju različite metode polaganja i stabilizacije kabela kako bi se osigurala sigurnost i dugoročna pouzdanost infrastrukture. Projektiranje trase također zahtijeva pažljivo promišljanje o postojećoj podvodnoj infrastrukturi kako bi se izbjegli sudari i konflikti.

Tehnički dizajn trase uključuje izbor odgovarajućeg tipa kabela, definiranje metoda spajanja te odabir spojnog pribora koji osigurava trajnost i pouzdanost. Nakon definiranja trase, proces dobivanja dozvola i odobrenja od strane relevantnih agencija ključan je kako bi se osigurala usklađenost s regulativama i normama.

U zaključku, projektiranje trase za polaganje podvodnih kabela predstavlja suštinski proces koji objedinjuje tehnički inženjering, zaštitu okoliša i pravne aspekte. Pravilno projektirana trasa osigurava trajnu povezanost, efikasan prijenos energije i podataka te minimalizira negativne utjecaje na prirodni svijet. Stoga, ova multidisciplinarna metodologija izgradnje podvodne kabelske infrastrukture osigurava održivost i napredak u globalnom tehnološkom pejzažu.

Da rezimiramo, evo osnovnih koraka u projektiranju trase:

- 1. Identifikacija potreba:** Prvi korak je razumjeti svrhu kabela - da li je to za telekomunikacije, električnu energiju, podatkovne veze ili nešto drugo. Definiranje kapaciteta, brzine prijenosa i ostalih tehničkih specifikacija bitno je za odabir odgovarajućeg tipa kabela.
- 2. Geotehničke i hidrografske analize:** Prije projektiranja trase, potrebno je provesti temeljite geotehničke i hidrografske analize. Ovo uključuje istraživanje dubine mora, karakteristika morskog dna, prisutnost podvodnih prepreka poput boulder polja i koralja te podlogu koja će držati kabel.
- 3. Izbjegavanje osjetljivih područja:** Potrebno je izbjegavati osjetljiva područja poput ekosustava koraljnih grebena, morskog života i arheoloških nalazišta. Ovo je važno kako bi se minimizirali negativni utjecaji na okoliš.
- 4. Analiza morskih struja i vremenskih uvjeta:** Morske struje i vremenski uvjeti igraju ključnu ulogu u stabilnosti trase. Analiza ovih faktora pomaže odrediti optimalno vrijeme polaganja i osigurava stabilnost kabela tijekom vremenskih nepogoda.
- 5. Razmatranje dubine mora:** Dubina mora ima utjecaj na vrstu kabela koja se koristi i tehniku polaganja. Veće dubine mogu zahtijevati posebne tehnike kao što su sidreni kabeli za podupiranje.

- 6. Razmatranje postojeće infrastrukture:** Potrebno je razmotriti postojeće podvodne infrastrukture poput naftovoda, plinovoda i postojećih kabela kako bi se izbjegla međusobna oštećenja.
- 7. Određivanje trase:** Na temelju prikupljenih podataka, projektant određuje optimalnu trasu za kabel. To uključuje definiranje točaka polaganja, ulaza i izlaza, te specifične putanje kojom će kabel ići.
- 8. Tehnički dizajn:** Nakon odabira trase, potrebno je izraditi tehnički dizajn koji uključuje odabir tipa kabela, spojne metode, tehničke specifikacije spojnog pribora i ostale tehničke detalje.
- 9. Priprema dozvola:** Ovisno o području, projekt može zahtijevati različite dozvole i odobrenja. Potrebno je osigurati da su svi potrebni zakonski i regulativni zahtjevi ispunjeni.
- 10. Praćenje i upravljanje:** Nakon što je trasa projektirana i kabel položen, važno je provesti redovito praćenje kako bi se osigurala ispravna funkcioniranje i identificirali eventualni problemi.

#### **4.4. Tehnologija polaganja**

Podmorski kabeli se polažu pomoću specijaliziranih brodova poznatih kao kabelopolagači. Ovi brodovi su namijenjeni isključivo za postavljanje i održavanje podmorskih kabela. Njihov pramac je produžen kako bi se omogućilo smještanje kolotura za vođenje kabela, dok se na krmi nalazi kolotur ili klizna staza koja pomaže u procesu polaganja. Za precizno pozicioniranje broda koristi se DGPS (Differential Global Positioning Systems) koji omogućuje precizno vođenje broda s točnošću od  $\pm 10$  cm.





Slika 4.9. Kabelopolagač M/V Ariadne [20]



Slika 4.10. Kabelopolagač M/V Ariadne [21]

Ariadne je specijalizirani brod za polaganje podvodnih kabela opremljen DP-3 sustavom (dinamičko pozicioniranje), što mu omogućuje precizno pozicioniranje tijekom operacija diljem svijeta. S posebnim naglaskom na energetske kabele, brod je projektiran za polaganje, zaštitu i

popravak ovih kabela, ali također ima kapacitete za ronjenje, rad s ROV-ima (daljinski upravljani vozila), istraživanje i rad na podvodnim instalacijama (IMR - Inspekcija, Održavanje i Popravak).

Ovaj brod temelji se na dizajnu Ulstein SX-121 i prvobitno je sagrađen u Norveškoj 2009. godine pod imenom "Viking Poseidon". Trenutni vlasnici preuzeli su ga u ožujku 2017. Nakon isporuke, brod je promijenio klasifikacijsku oznaku s DnV-GL na ABS, kako bi se uskladio s politikom kompanije.

Primarna svrha Ariadnea je izvođenje zahtjevnih projekata polaganja energetskih kabela. Međutim, brod je višenamjenski i može se koristiti za razne podvodne i priobalne projekte. Brod posjeduje prostranu stražnju palubu od 1620 kvadratnih metara s nosivošću od 6500 tona, kao i veliki hangar za ROV-ove, prikladan za smještaj 2 WROV-a (daljinski upravljanih vozila za podvodna istraživanja). Opremljen je mehanizmom za bočno lansiranje i lansiranje kroz moonpool (otvor u brodu za ulazak i izlazak podvodnih vozila).

Također je opremljen s offshore dizalicom kapaciteta dizanja od 250 tona, uključujući kompenzaciju gibanja i pomoćno vitlo kapaciteta 25 tona, s mogućnošću prijevoza ljudi. Na palubi se trenutno nalazi kabelski karusel kapaciteta 1500 tona. Brod je izgrađen prema standardima DnV-GL Comfort Class (C-3, V-3) i može primiti ukupno 106 osoba uz najvišu razinu udobnosti. Sve ove značajke čine Ariadnea iznimno sposobnim i opremljenim brodom za raznovrsne podvodne operacije [21].

Još nekoliko specifikacija o samom brodu:

- Duljina: 130 m
- Širina: 25 m
- Gaz: 7,8 m
- Istisnina: 10450 tona
- Putna brzina: 14,5 čvor-a

Različite tehnike primjenjuju se ovisno o tome radi li se o obalnom ili dubinskom polaganju pomorskog kabela. Na plićim obalnim područjima, kabelopolagač se približava mjestu polaganja što je više moguće bliže obali. Nakon toga, kabel se postupno izvlači prema kopnu uz pomoć plutajućih balona kako bi se osiguralo da ne potone.



Slika 4.11. Polaganje na obalnom području pomoću plutajućih balona [21]

Kod dubinskog polaganja kabela, prvo se izvlači iz spremišta te postupno spušta u more dok se ne postigne potrebna dubina. Nakon što smo postigli potrebnu dubinu, kabel se počinje sam izvlačiti iz spremišta zahvaljujući vlastitoj težini. Kabelopolagač koristi kočnicu za održavanje kontrolirane brzine spuštanja kabela koji se počinje spuštati svojom težinom u morske dubine. Važno je da ispuštena duljina kabela u moru bude uvijek 2 do 10% duža od stvarne horizontalne duljine trase. Pravilno je općenito da se na svakih 1000 m dubine ispušta dodatnih 3% kabela. Kada se kabel spusti do suprotne točke od početka polaganja, dubinski kabel se presijeca i spaja s obalni kabelom koji je položen u gore opisanom postupku (pomoću plutajućih balona).

Prilikom definiranja trase podmorskih kabela, ključno je razmotriti faktore kako bi se osigurala adekvatna zaštita na mjestima s povećim rizikom od oštećenja uzrokovanih ljudskim aktivnostima, kao što su ribarstvo, usidranje i plovidba. Evo nekoliko tehnika zaštite podmorskih kabela na takvim mjestima:

- **Izbjegavanje lučkih područja:** Prilikom definiranja trase, potrebno je planirati rutu koja se što više udaljava od gužvanih lučkih područja. Ovo smanjuje mogućnost slučajnog oštećenja tijekom luke manipulacija teretom i plovilima.
- **Duboko ukopavanje:** Kabeli se mogu ukopati duboko u dno mora kako bi se smanjila izloženost površinskim aktivnostima. Ova tehnika minimizira rizik od slučajnog oštećenja tijekom ribolova, usidranja i drugih ljudskih aktivnosti.

- **Zaštitne cijevi i omotači:** Postavljanje zaštitnih cijevi ili omotača oko kabela može pružiti dodatnu zaštitu od vanjskih utjecaja. Ovi omotači mogu biti otporni na udarce, abraziju i kemikalije, čime se produžuje životni vijek kabela.
- **Oznake i upozorenja:** postavljanje boja, oznaka i upozorenja na površini vode može upozoriti plavila i ribare na prisutnost podmorskih kabela. To može smanjiti slučajne sudar ili oštećenja prilikom ribolova i plovidbe.
- **Restriktivne zone:** Identificiranje područja s visokim rizikom od oštećenja i označavanje ih kao restriktivne zone za određene aktivnosti može pomoći u sprječavanju nesreća. Ove zone bi trebale biti jasno označene i regulirane.
- **Nadzor i detekcija:** Postavljanje sustava za nadzor i detekciju može brzo identificirati bilo kakve potencijalne prijetnje kabela. To omogućava brzu reakciju i intervenciju kako bi se spriječila ozbiljna oštećenja.
- **Edukacija i svijest:** Edukacija ribara, nautičara i drugih korisnika mora o prisutnosti podmorskih kabela i važnosti izbjegavanja njihovog oštećenja može značajno smanjiti rizik od nesreća.
- **Suradnja s lokalnim zajednicama:** Rad s lokalnim zajednicama i dionicama može pomoći u uspostavi smjernica i protokola za sigurnu interakciju s podmorskim kabelima.

Neke metode polaganja podmorskih kabela su:

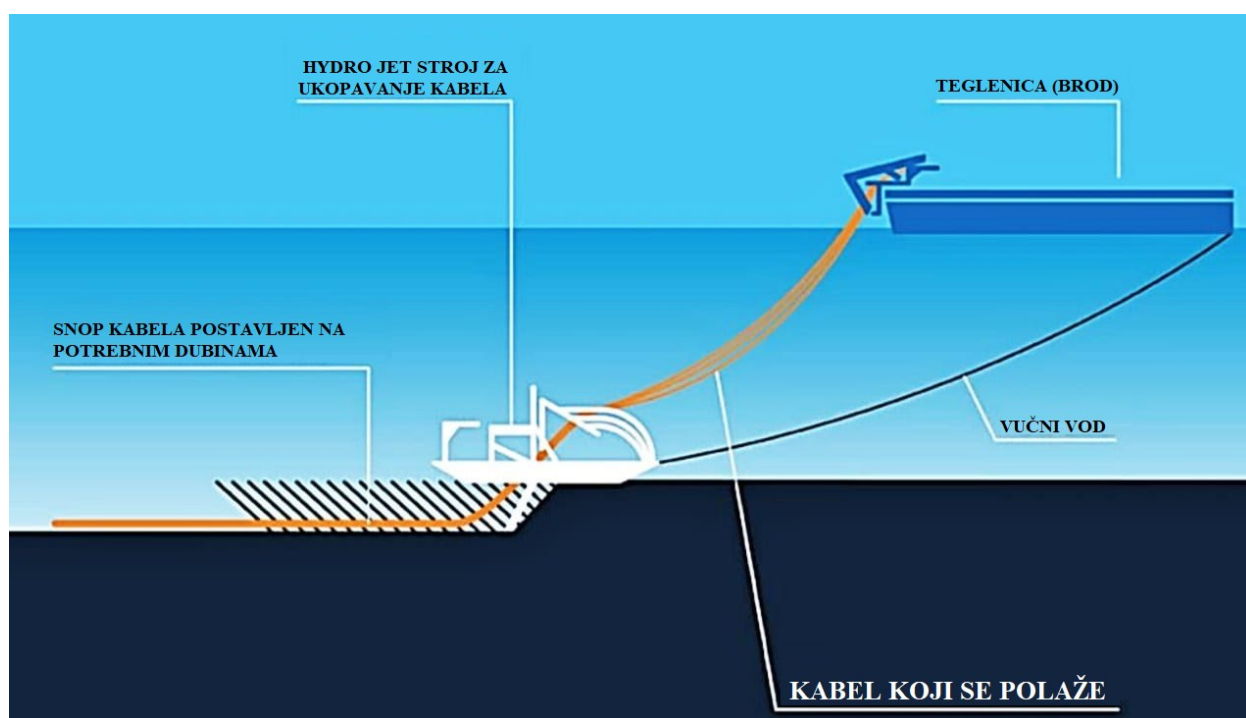
- „Jetting“
- Pluženje
- Glodanje
- Pokrivanje podlogama

Metoda vodenog špricanja, poznata i kao „jetting“, predstavlja izuzetno poželjan način za polaganje i zaštitu kabela. Ova visoko efikasna i sigurna tehnika koristi se prvenstveno u situacijama gdje je tlo muljevito ili pješčano te se primjenjuje na dubinama do otprilike 400 m. Ključni alat koji omogućuje ovo tehniku je podvodno vozilo poznato kao ROV (Remote Operated Vehicle), koje se kreće neovisno o brodu zahvaljujući vlastitom pogonu.

Sam proces polaganja kabela koristi hidraulične vodene pumpe koje pod velikim pritiskom izbacuju vodu kroz posebne mlaznice. Vodeni mlaz stvara rov na morskom dnu, u koji se postavlja kabel. Kada je kabel već položen na dno, mlaznica stvara rov u koji kabel prirodno klizi. Nakon što je kabel postavljen, materijal koji je bio pomaknut mlazom vode se vraća u svoj prvobitni položaj, čime se kabel pouzdano pokriva i štiti od vanjskih utjecaja.

Ova inovativna tehnika donosi brojne prednosti. Prvo, omogućuje učinkovito polaganje kabela na dubokim morskim dnom, gdje drugi pristupi mogu biti izazovni i nepraktični. Drugo, koristeći ROV za izvođenje ovog postupka, osigurava se fleksibilnost i preciznost, budući da ROV može neovisno navigirati i prilagoditi se terenu. Također, tijekom cijelog procesa, kabel je zaštićen od oštećenja zahvaljujući vodenom mlazu, čime se osigurava dugotrajna i pouzdana veza.

Sve u svemu, tehnika vodenog špricanja ili „jetting“ predstavlja visoko učinkovit način polaganja i zaštite kabela na morskom dnu. Kombinacija ROV-a i hidrauličnih vodenih pumpi omogućuje precizno polaganje kabela u izazovnim uvjetima i na značajnim dubinama, čime se osigurava sigurna i stabilna komunikacija ili prijenos podataka putem kabela.



Slika 4.12. Jednostavna skica koja prikazuje podmorski uređaj koji se koristi za ugradnju kabela na morsko dno [23]

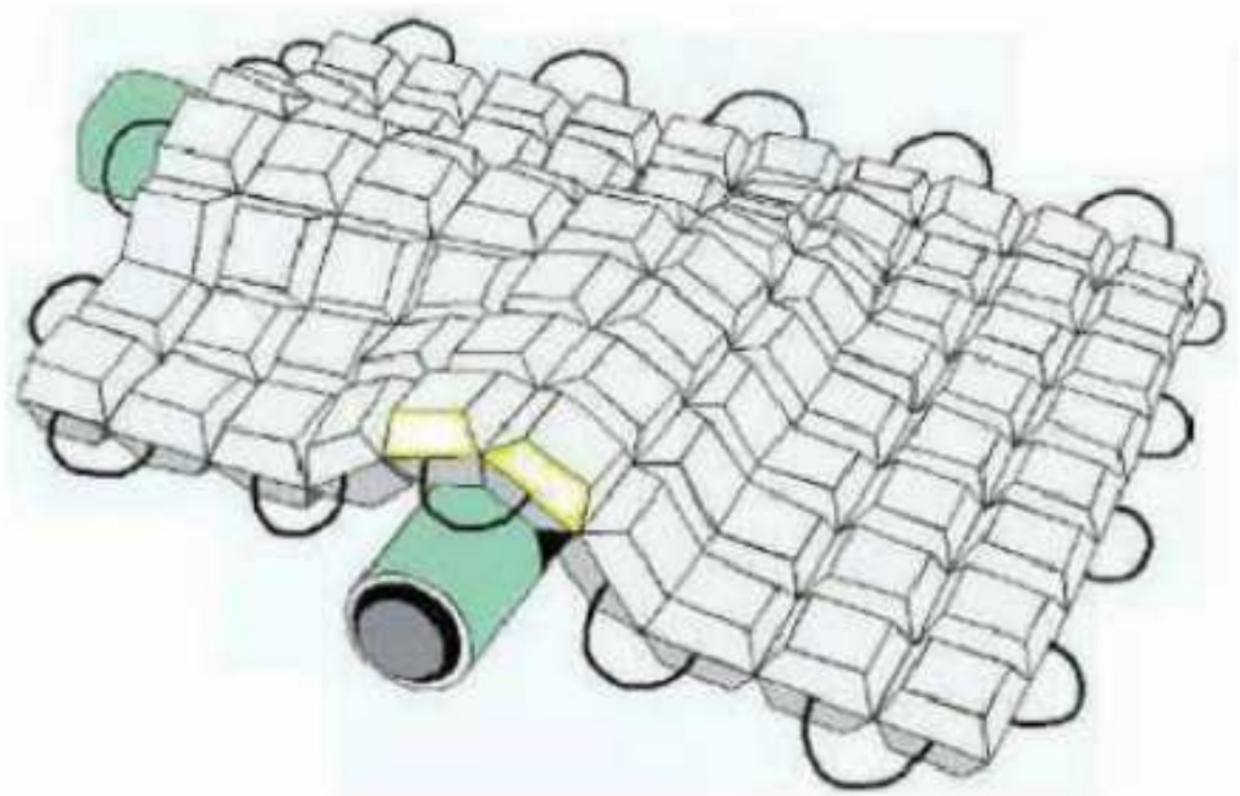
Metoda pluženja predstavlja jednostavnu mehaničku tehniku za polaganje kabela na dnu oceana. Naziv metode sugerira njezinu suštinu, koristi se poseban plug težak između 10 i 30 tona, koji je pričvršćen za brod i vuče se po morskom dnu. Proces pluženja obuhvaća istovremeno kopanje rova, polaganje kabela unutar tog rova te zatrpavanje rova kako bi se kabel adekvatno zaštitio. Važno je istaknuti da, iako učinkovita, metoda pluženja nosi sa sobom određene rizike. Korištenje mehaničkog pluga vučenog po dnu oceana može dovesti do potencijalnih oštećenja kabela zbog trenja, pritiska i drugih neželjenih sila. Stoga se ova tehnika obično primjenjuje na područjima gdje je morsko dno tvrdo i manje podložno oštećenjima. Pluženje može biti brza i efikasna opcija

za polaganje kabela na određenim podvodnim terenima, važno je provesti temeljitu procjenu i analizu prije nego se odluči za ovu tehniku. Potrebno je uzeti u obzir karakteristike morskog dna, dubinu, vrstu kabela i druge faktore kako bi se smanjio rizik od oštećenja kabela tijekom postupka. U zaključku, pluzenje je metoda koja se primjenjuje za polaganje kabela na dnu oceana u uvjetima gdje je to prikladno i kada se želi ubrzati postupak kopanja rova, polaganja kabela te zatrpavanja rova. No, važno je biti svjestan povezanih rizika te poduzeti sve potrebne mjere predostrožnosti kako bi se osigurala netaknuta funkcionalnost kabela nakon završenog pluzenja.

Metoda glodanja predstavlja postupak polaganja kabela koja je često povezana s visokim troškovima i drugim vremenom izvođenja. Ova tehnika se primjenjuje isključivo kada je morsko dno iznimno čvrsto (tvrdo), odnosno kada se radi o stijenama ili tvrdim sedimentima. Uređaj korišten za ovu vrstu ukopavanja opremljen je rotirajućim oštricama kojima se stvara rov dubine bar 50 cm. Važno je napomenuti da se ovakav način ukopavanja rijetko koristi u praksi. Glavni razlog za ograničenu primjenu glodanja leži u složenosti i resursima koje zahtijeva. Postupak glodanja može biti dugotrajan i zahtjevan proces, te zahtijeva precizno planiranje i nadzor kako bi se osigurala uspješna izvedba. Također, visoki troškovi povezani s potrebnom opremom, vremenom i stručnošću za glodanje čine ovu tehniku manje privlačan u usporedbi s drugim bržim i ekonomičnijim metodama. Glodanje se primjenjuje samo u posebnim situacijama gdje je morsko dno izrazito tvrdo, ova metoda može biti ključna u situacijama gdje je zaštita kabela od vanjskih oštećenja iznimno važna. Korištenje ove tehnike zahtijeva pažljivu analizu terena i stručnost operatera kako bi se osigurala učinkovito ukopavanje kabela čak i u izuzetno zahtjevnim uvjetima.

Zaštita kabela putem pokrivanja podlogama ili kamenjem predstavlja metodu koja se koristi tamo gdje je klasično ukopavanje kabela teško ili nemoguće provesti. Umjesto tradicionalnog ukopavanja, ovaj postupak uključuje postavljanje materijala kao što su betonske podloge ili običan kamen preko kabela kako bi se osigurala zaštita. Betonske podloge obično se sastoje od betonskih blokova koji su povezani tekstilnim ili metalnim šiljcima te se postavljaju iznad kabela. Ova konstrukcija pruža stabilnost i sigurnost za kabele, štiteći ih od vanjskih utjecaja. Dizajn betonskih podloga je prilagodljiv, omogućujući prilagodbu specifičnim karakteristikama morskog dna. To znači da se može osigurati optimalna zaštita čak i u različitim uvjetima. Alternativno, koristi se i običan kamen kao materijal za zaštitu. Kamen se postavlja preko kabela kako bi stvorio zaštitni sloj između kabela i okoline. Spomenuta metoda je korisna na mjestima gdje je upotreba betonskih podloga manje praktična ili izvediva. Zaštita putem pokrivanja materijalima predstavlja učinkovitu strategiju za očuvanje integriteta kabela kada je tradicionalno ukopavanje teško izvedivo. Odabirom odgovarajućih materijala i prilagodljivim dizajnom, ovakav pristup omogućuje zaštitu

kabela i osigurava pouzdanu komunikaciju ili prijenos podataka čak i u izazovnom podmorskim uvjetima.



Slika 4.13. *Primjer pokrivanja kabela betonskom podlogom* [23]

## 4.5. Izbor spojnog pribora

### 4.5.1. Spojnice podmorskih kabela

Proizvodnja spojeva podvodnih energetske kabela predstavlja izazovan proces koji zahtijeva pažljivo usklađivanje broskog vremena, specijalizirane opreme, stručnih timova i povoljnih vremenskih uvjeta. Ovaj zahtjevni postupak može značajno utjecati na izgled i pouzdanost spojeva, kao što se vidjelo u prošlosti s neuspjelim instalacijskim spojevima koji su bacili sjenku na cijelu industriju. Takvi neuspjesi obično su rezultat nedovoljno kvalitetnog inženjeringa ili neadekvatnih postupaka instalacije. Na primjer, prvi spojevi kabela u Cook Strait regiji suočili su se s neuspjehom ili potrebom za popravkom, što je prouzročeno nedovoljnom kvalitetom inženjeringa pri spajanju vodiča različitih veličina [18].

Važno je istaknuti da su današnji podvodni energetske kabela stekli znatno povoljniji ugled. Rezultati studije Cigré iz 1986. godine o pouzdanosti ovih kabela pokazuju da spojevi sada čine

samo 18% ukupnih neuspjeha, dok su sami kabeli odgovorni za preostalih 82%. Ovaj značajan napredak u pouzdanosti posljedica je unaprjeđenih inženjerskih metoda, preciznijih metoda za istraživanje ruta, te sve sofisticiranijih postupaka instalacije koji su oblikovali industriju tijekom posljednjih dvadeset godina.

Vodeći proizvođači podvodnih energetske kabela sada su sposobni pružiti spojeve visoke kvalitete i pouzdanosti, često izrađene od strane dobro obučениh timova uz podršku adekvatne brodske opreme. Ovo jasno pokazuje da spojevi više nisu slabu točku u cijelom sustavu, što je rezultat kontinuiranog napretka i unaprjeđenja u industriji.

Unatoč značajnim poboljšanjima, i dalje je pametno minimizirati broj spojeva kabela koliko god je to moguće, s obzirom na zahtjeve povoljnih vremenskih uvjeta za postupak izrade spojeva. Složenost ovih spojeva dodatno se naglašava različitim vrstama spojeva, kao što su tvornički spojevi, instalacijski spojevi, spojevi za popravke te fleksibilni i čvrsti spojevi, primjenjivi na jednožilne i trožilne kabele.

Kako bi se izbjegla konfuzija i osigurala optimalna pouzdanost, ključno je kontinuirano ulagati u obrazovanje i osposobljavanje stručnih timova te primjenjivati najbolje inženjerske prakse. Na ovaj način, industrija podvodnih energetske kabela nastavlja napredovati prema još većoj pouzdanosti i učinkovitosti, osiguravajući kontinuirano snabdijevanje energijom širom svijeta.

#### 4.5.1.1. Tvornički spojevi

Tvornički spoj povezuje poluproizvedene segmente kabela prije nego što se nanese zaštita armature. Ovi spojevi također dolaze do upotrebe kada proizvodni nedostaci zahtijevaju rezanje proizvodne duljine kabela kako bi se eliminirali oštećeni dijelovi. Fleksibilnost spojeva omogućuje nanošenje kontinuirane armature preko spoja koristeći uobičajeni stroj za armiranje u tvornici.

Proizvodnja tvorničkih spojeva (kao što je prikazano na slici 4.14.) započinje spajanjem krajeva kabela putem različitih metoda zavarivanja kao što su TIG (Tungsten Inert Gas), MIG (Metal Inert Gas), i druge metode. Frikcijsko zavarivanje se koristi za povezivanje materijala poput aluminija i bakra. Za višenamjenske vodiče, spojevi se mogu ostvariti jednim zavarivanjem preko cijelog promjera ili postupkom zavarivanja po pojedinim žicama. Izbor odgovarajuće metode zavarivanja i pravilnih dodatnih materijala ima ključnu ulogu u osiguranju mehaničkih svojstava potrebnih za



spoj vodiča. Važno je izbjegavati nedostatke u zavarivanju poput prekida, pukotina, poroznosti, nepotpunog zavarivanja, prodora ili nekovinskih inkluzija.



Slika 4.14. *Tvornički spoj ekstrudiranog kabljske jezgre (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]*

Kvaliteta zavara ponekad se provjerava primjenom rendgenskih zraka kako bi se osigurala integritet. Čvrstoća spoja pod opterećenjem izuzetno je bitna za instalaciju podmorskih energetskih kabela. Dio vodiča koji se nalazi uz toplinsku zonu zavarenog dijela često je slabiji jer je pogođen toplinom zavarivanja. Čvrstoća tog dijela često iznosi samo 70% čvrstoće originalnog vodiča. Ponekad se koriste i druge metode spajanja vodiča, kao što su čelične čahure koje se stiskaju na krajeve vodiča ili postupci lemljenja [19].

Električna vodljivost vara mora biti adekvatno visoka kako bi se izbjegle točke visokog otpora unutar kabela. Međutim, lokalno umjereno povećanje specifičnog otpora materijala zavara nije presudno jer se toplina generirana viškom gubitaka učinkovito raspršuje u susjedne vodiče.

Navojni spojevi se obično ne koriste za tvorničke spojeve jer bi njihova prisutnost povećala promjer kabela i ometala daljnje proizvodne procese.

Nakon spajanja vodiča, izolacija se izgrađuje, obično s istom strukturom kao izolacija kabela. Izolacija na oba kraja kabela sužava se kako bi se formirale konusne površine. Zatim se nanosi nova izolacijska materijala između dva sužena kraja kabela. Dulji konusni prijelaz osigurava niže aksijalno električno polje duž osjetljivog prijelaza. U većini slučajeva, izolacija spoja nešto je deblja od izolacije kabela kako bi se smanjio električni stres na tom mjestu.

Generički dizajn tvorničkih spojeva koji je opisan može se primijeniti i na kabele s izolacijom od papira i polimernim kabelima.

Izolacija spojeva za kabele s polimernom izolacijom (poput XLPE, PE, EPR) izrađuje se od traka sličnog materijala, koje se presavijaju i postavljaju unutar praznine između kabela. Ekрани se izrađuju od traka polimernih materijala opterećenih crnim ugljikom radi elektromagnetske zaštite.

Proces izrade izolacije spojeva uključuje zagrijavanje i pritisak kako bi se trake stopile zajedno i stvorio homogeni neprekidni sloj bez praznina. U slučaju korištenja XLPE traka, vrijeme potrebno za stvrdnjavanje je duže zbog procesa umrežavanja koji se događa. Dodatno, pritisak pomaže sprječavanju stvaranja plinskih mjehurića tijekom umrežavanja XLPE traka.

Izuzetno je važno osigurati da nema nikakvih praznina, razmaka, pukotina ili nečistoća na prijelazu između izolacije kabela i izolacije spoja. Priprema ekrana za vodiče i prijelaza između ekrana vodiča unutar kabela i ekrana u spoju je osjetljiv postupak koji zahtijeva iznimnu pažnju (kao što je prikazano na slici 4.15.). Adekvatno prijanjanje izolacije spoja na izolaciju kabela ima ključan utjecaj na električnu čvrstoću spoja.



Slika 4.15. *Primjena izolacije spoja od XLPE materijala u čistim uvjetima (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]*

Za naponske razine do uključivo 110 kV, također je moguće koristiti samospajajuće trake kao izolaciju za spojeve. Ove trake se nanose s precizno definiranom napetosti. Proces samospajanja rezultira kompaktnim izolacijskim materijalom nakon nekoliko dana.

Kod kabela s izolacijom od papira, izolacija fleksibilnog spoja ima sličnu strukturu kao i sam kabel. To uključuje zaslon vodiča, električnu izolaciju i izolacijski zaslon. Zasloni se izrađuju od traka papira koje su impregnirane crnim ugljenom. Impregnirane papirne trake ručno se nanose ili se koristi poluautomatski stroj za presavijanje (kao što je prikazano na slici 4.16.). Važno je napomenuti da bi proizvodnja spojeva trebala biti izvedena u prostorijama s kontroliranom vlagom i temperaturom kako bi se osigurala optimalna kvaliteta.



Slika 4.16. *Primjena izolacije od papira za fleksibilni spoj pomoću poluautomatskog stroja za preklapanje (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]*

Tvornički spoj također uključuje olovni zaštitni omotač koji pokriva spojenu izolaciju. Olovni omotač primjenjuje se kao široka olovna cijev koja se stavlja preko spoja i postavlja sa strane tvorničkog spoja prije spajanja vodiča. Nakon završetka izolacije, olovna cijev gura se preko tvorničkog spoja, stisne kako bi čvrsto prijanjala uz izolaciju spoja, obreže se i zalemi na olovni

omotač kabela. Kod kabela impregniranih masom, izolacija unutar olovne zaštitne cijevi može se ponovno tretirati kako bi se postigla potpuna zasićenost izolacije papira i ulja.

Naposljetku, preko olovnog omotača ili drugih vanjskih slojeva, primjenjuje se zaštitna polimerna skupljajuća cijev. Sada tvornički spoj postaje neodvojiv dio jezgre energetskog kabela i spreman je za daljnje korake u proizvodnoj liniji, kao što je uokvirivanje armaturom. Blago povećana veličina tvorničkog spoja ne predstavlja zapreku za nastavak proizvodnje.

#### 4.5.1.2. Spojevi za instalaciju na moru

Montažni spojevi, ili spojevi postavljeni na terenu, imaju ključnu ulogu u funkcionalnosti podmorskih energetskih kabela. Ovi spojevi obuhvaćaju sve bitne komponente kompletnog kabela: vodiče, izolacijski sustav, armiranje te sve međuslojeve. Proces izrade takvih spojeva odvija se na brodovima koji plovo po otvorenom moru ili na obali, zahtijevajući visoku preciznost i temeljitost kako bi se osigurala optimalna izvedba.

Prilikom razmatranja montažnih spojeva u kontekstu podmorskih kabela, ključno je razmotriti nekoliko važnih aspekata. Proces izrade ovih spojeva odvija se na terenu, gdje se fizički povezuju podmorski kabeli radi prijenosa električne energije. Ovisno o specifičnim karakteristikama kabela i dizajnu spoja, izrada montažnog spoja može potrajati između jednog i deset dana, osiguravajući da su oba kraja kabela pravilno postavljeni unutar spojne kabine na brodu.

Istaknuta je ključna važnost smanjenja vremena potrebnog za izradu montažnih spojeva. Za postizanje tog cilja, montažni spoj treba pažljivo koncipirati kako bi se smanjila ukupna izloženost ekstremnim vremenskim uvjetima. Ovi spojevi se oblikuju na brodovima koji su izloženi nepredvidivim vremenskim uvjetima na otvorenom moru. Radi smanjenja rizika za posadu koja obavlja spajanje, kao i sam kabel, iznimno je važno minimizirati vrijeme izloženosti teškim vremenskim uvjetima.

Za uspješno izvođenje montažnih spojeva ključan je pronalazak prikladnog vremenskog prozora. Skraćeno vrijeme potrebno za spajanje povećava šanse za identificiranje odgovarajućeg razdoblja s mirnim morem. Nakon što se proces spajanja pokrene, prekidanje nije opcija, osim ako se ne želi prekinuti sam kabel.

Montažni spojevi predstavljaju ključne komponente podmorskih energetske kabela. Njihova izrada zahtijeva temeljito planiranje i precizno izvođenje kako bi se osigurala stabilnost i visoka kvaliteta spojeva. Bitno je smanjiti vrijeme izloženosti nepovoljnim vremenskim uvjetima kako bi proces spajanja prošao sigurno i uspješno.

#### 4.5.1.2.1. Fleksibilni spojevi

Fleksibilni spojevi igraju ključnu ulogu u polaganju i održavanju podvodnih energetske kabela. Oni omogućuju spajanje kabela različitih duljina na otvorenom moru te olakšavaju intervencije i održavanje u dubinama pod vodom. Ovaj dio teksta istražuje važnost fleksibilnih spojeva u podvodnim kabelskim sustavima, detaljno opisujući njihovu svrhu, proces izrade i raznoliku primjenu.

Fleksibilni spojevi koriste se kad je potrebno spojiti standardne isporuke kabela tijekom dugih ruta. Nakon što prva faza polaganja kabela završi, brod se upućuje prema proizvođaču ili luci za preuzimanje sljedeće kabelske dužine. Tamo se prva dužina kabela vuče preko koluta za polaganje do priključnog šatora na brodu. Druga dužina kabela, koja je još uvijek na brodu, spojena je na prvu dužinu putem fleksibilnog instalacijskog spoja.

Izrada fleksibilnih spojeva zahtijeva precizan postupak. Spajaju se vodiči, izolacija i olovni omotač, slično kao u tvorničkom spoju. Važno je osigurati čvrstoću i fleksibilnost spoja. Za to se koristi žičano armiranje koje prekriva spojni dio. Prostor između armature dvaju krajeva kabela zatvara se prethodno namotanim žicama koje su zavarene za žice s jedne strane spoja. Nakon omatanja oko spoja, žice se povezuju s žicama armature s druge strane. Potrebno je stvoriti napetost u žicama armature kako bi se održale čvrste napete sile. Tehnike zavarivanja osiguravaju optimalnu čvrstoću spoja između armature kabela i armature spoja.

Fleksibilni spojevi su esencijalni za različite vrste podvodnih kabela. Oni omogućuju povezivanje jednožilnih kabela s impregniranom masom ili polimernih kabela. Fleksibilni spojevi su primjenjivi za napone do 245 kV i čak su se koristili na trofaznim kabelima do 150 kV.

U situacijama gdje proizvođači kabela nemaju vlastitu morsku luku, fleksibilni spojevi omogućuju povezivanje više kraćih dužina kabela kako bi se postigla željena isporučena duljina. Iako ovaj postupak može biti izazovan, fleksibilni spojevi olakšavaju transport i polaganje kabela na dugim morskim rutama.

Fleksibilni spojevi igraju ključnu ulogu u podvodnim energetskeim kabelima. Njihova sposobnost povezivanja, održavanja strukturalne čvrstoće i prilagodljivosti čini ih neizostavnima za uspješno polaganje i održavanje kablskih sustava na velikim dubinama.

#### 4.5.1.2.2. Kruti spojevi

"Rigidni spojevi" (ili "čvrsti spojevi") značajno se razlikuju od fleksibilnih spojeva. Naziv jasno implicira da ovi spojevi posjeduju čvrstu vanjsku ovojnicu, često u obliku čelične cijevi (vidi slika 4.17.). Ova čelična cijev djeluje kao točka spajanja za oplatne žice na svakom kraju kabela i istovremeno pruža dodatnu zaštitu za unutarnje kablške spojeve.



Slika 4.17. Čvrsti podmorski instalacijski spoj u čeličnom omotaču za 1F kabel tijekom testa savijanja na obali [13]

Postoje raznoliki načini za povezivanje električnih sustava unutar čvrste vanjske ovojnice. Jedan od tih načina je fleksibilna metoda povezivanja, koja je opisana ranije. U ovoj metodi, krajevi jezgre kabela se spajaju na fleksibilan način. Vanjska čelična ovojnica dodaje mehaničku čvrstoću i stabilnost spoju.

Još jedan način povezivanja obuhvaća korištenje preoblikovanih spojnih omota za električne dijelove unutar čelične ovojnice. U ovom preoblikovanom dizajnu spoja, elastični omotač se

koristi, koji sadrži slojeve poluvodiča i izolacije. Ovaj elastični omotač djeluje kao veza između izolacije kabela s obje strane spoja (vidi slika 4.18.).



Slika 4.18. *Prethodno oblikovana polimerna kabela spojica. Elastomerni spojni omotač na vrhu. Vodič povezan i izolacija pripremljena za primjenu omotača izolacije na dnu [13]*

Koncept preoblikovanih ili unaprijed izrađenih spojeva postao je preferirana metoda za povezivanje polimernih kopnenih kabela zbog mnogih prednosti koje pruža:

- Kratko vrijeme montaže;
- Podržava sve vrste spojeva vodiča kao što su zavarivanje, kompresijski omotači i vijčani spojevi prema specifikacijama klijenta;
- Može se unaprijed testirati u tvornici.

Kontinuirani napredak tehnologije i inovacija stalno otvaraju nova područja primjene. Jedno takvo područje uključuje upotrebu čeličnih kućišta i prefabrikovanih spojeva čak i u izazovnim podmorskim aplikacijama. Da bi se osigurala potpuna vodonepropusnost i dugotrajnost spojeva, primjenjuju se različite tehnike i materijali.

U ovakvim situacijama, čelično kućište ima ključnu ulogu. Ono omogućuje primjenu prefabrikovanih spojeva čak i u zahtjevnim podmorskim okruženjima. Ponekad se unutar

čeličnog kućišta koristi dodatno kućište od bakra ili mesinga, koje obuhvaća prefabrikovani spoj i lemi se na olovnu ovojnici kako bi se postigla potpuna vodonepropusnost.

Proces spajanja vodiča na krajevima kabela obuhvaća rad s prefabrikovanim omotačem. Prvo se taj omotač proširuje radijalno i postavlja na pomoćnu potpurnu cijev. Nakon što su vodiči spojeni, a izolacija pripremljena prema uputama dobavljača, omotač se stavlja preko praznine u izolaciji. Zatim se potpurnom cijevi uklanja, omotač se pomakne preko praznine i pričvrsti na prethodno određeni položaj. Taj položaj omogućava omotaču da stvara radijalni pritisak na površine ispod izolacije. Naglašavamo da je taj radijalni pritisak ključan za održavanje dielektrične čvrstoće spoja tijekom cijelog vijeka trajanja. U nekim slučajevima, vanjski elementi s oprugama pomažu održavanju potrebnog radijalnog pritiska.

Prednost upotrebe prefabrikovanih spojeva uključuje mogućnost njihove predhodne provjere u prostorima proizvođača. Provedba visokonaponskih testova u tvorničkim uvjetima, često uz prateću analizu djelomičnih pražnjenja, omogućava otkrivanje mogućih nedostataka u izolacijskom materijalu te potvrdu dielektrične čvrstoće samog omotača spoja.

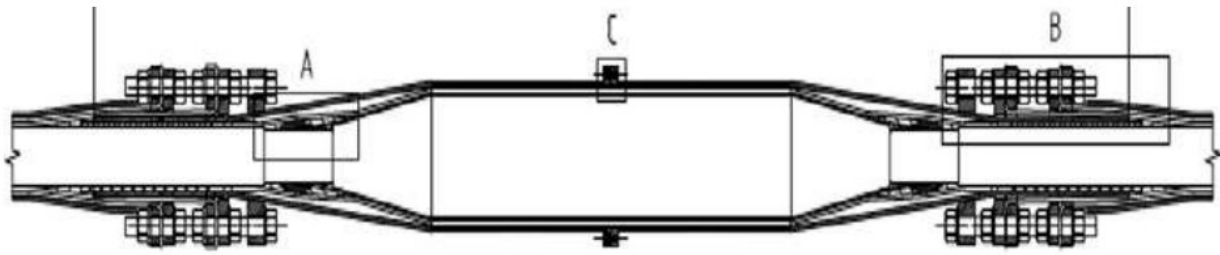
Međutim, bitno je napomenuti da ovakav test ne može otkriti loše izvedene instalacije. Zato se osnovni spoj često oprema vlastitim sustavom za zaštitu od vode, često koristeći olovnu ovojnici. U situacijama kada je prefabrikovani omotač spoja velikih dimenzija, primjenjuje se kućište od bakra ili mesinga kako bi se spoj potpuno zaštitio od vode.

Za kabele srednjeg napona, moguće je primijeniti polimernu zaštitu od vode, a spoj se dodatno pokriva skupljajućom cijevi kako bi se osigurala zaštita.

Nakon što se vodiči spoje, oni se umetnu u vanjsko čelično kućište. Kućište je oblikovano s posebnom strukturom koja uključuje cilindrični dio i konusne krajeve. Način na koji se dijelovi kućišta spajaju može varirati, bilo putem zavarivanja ili korištenjem matičnih vijaka i matica. Žičano armiranje s obje strane spoja se mehanički pričvršćuje za kućište pomoću stezaljki ili zavarivanjem.

Ova tehnološka inovacija omogućuje visoku pouzdanost i dugotrajnost spojeva čak i u zahtjevnim uvjetima podmorničkih okruženja, što osigurava kontinuitet energije i sigurnost operacija.





Slika 4.19. Kućište od bakra i čelika za prethodno oblikovani spoj [13]

Slika 4.19. pruža detaljan uvid u bakreno i čelično kućište za prethodno oblikovane spojeve. Na slici jasno vidimo proces lemljenja bakrenog kućišta na olovnu ovojnici kabela (označeno kao "A"), kao i particiju čeličnog kućišta (označeno kao "C"). Ključnu ulogu igra samo kućište koje čvrsto povezuje oplašćujuće slojeve s obje strane kabela (označeno kao "B"). Za manje zahtjevne uvjete, kao što su plitke vode, koriste se polimerna kućišta. No, posebna pažnja mora se posvetiti prijelazu između slojeva kabela i odgovarajućih slojeva spoja, jer procesi poput proizvodnje, transporta, instalacije i održavanja mogu izložiti spoj značajnom mehaničkom stresu.

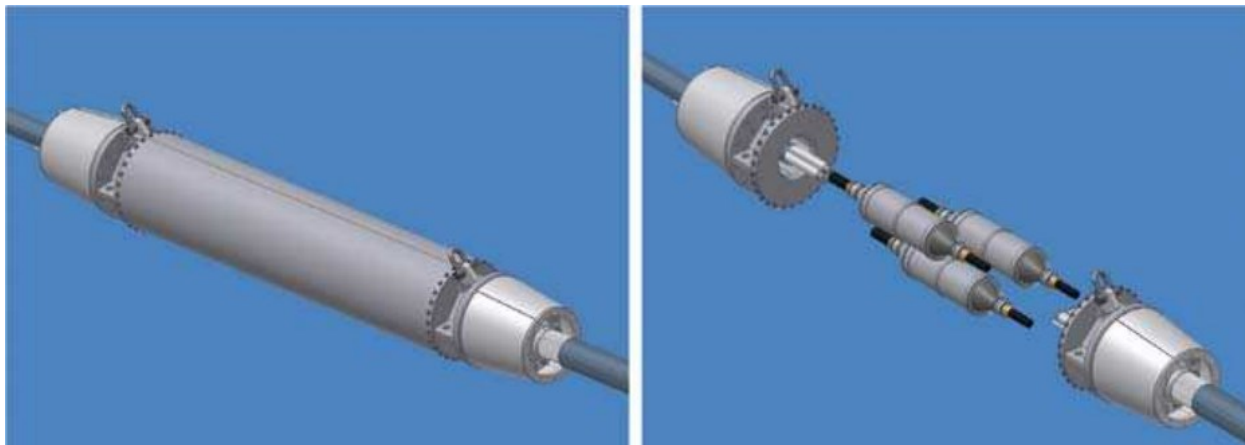
Radi sprečavanja problema oštih savijenih lukova kabela na prijelazu između čvrstog kućišta spoja i fleksibilnog oplašćenja podmorskog kabela, koriste se ograničivači savijanja u obliku konusnih gumiranih manžeta. Ovi ograničivači štite kabel prilikom izlaska iz čeličnog kućišta.

Bitno je napomenuti da čvrsti spojevi ne mogu biti jednostavno transportirani i postavljeni uz upotrebu standardne opreme za polaganje kabela, s obzirom na njihovu krutost i povećani promjer. Ovdje dolazi do izražaja potreba za specijaliziranim dizalicama rasporedima kako bi se čvrsti spojevi uspješno instalirali.

Postoji dilema u vezi s prednostima čvrstih spojeva u usporedbi s fleksibilnim spojevima. Iako fleksibilni spojevi imaju prednost jednostavnijeg dizajna i lakše instalacije, koristi koje pružaju prefabrikovani omotači spojeva i pouzdana mehanička zaštita putem čeličnog kućišta mogu nadmašiti potrebu za dodatnim komponentama. Naposljetku, ključna je brzina montaže na brodu.

U današnjim vremenima, čvrsti spojevi često se primjenjuju na trožilnim kabelima, gdje se svaka jezgra kabela zasebno spaja i zaštićuje unutarnjim vodonepropusnim kućištem. Ovo unutarnje kućište često je izrađeno od bakrene cijevi i lemljeno na olovnu ovojnici kabela. Prednost ovog pristupa leži u funkcionalnoj separaciji unutarnjeg kućišta koje pruža vodonepropusnu zaštitu i vanjskog čeličnog kućišta koje nosi nosive sile i oplašćenje. Također, vanjsko kućište može poslužiti za postavljanje spojne kutije za optičke kabele, što pruža dodatnu fleksibilnost u dizajnu.

Korištenje čvrstih spojeva i čeličnih kućišta u podmorničkim primjenama nosi sa sobom niz tehničkih izazova i prednosti. Kroz pažljivo planiranje, testiranje i inovativan dizajn, industrija nastoji osigurati stabilnost, trajnost i optimalne performanse ovih ključnih komponenata podmorskih energetske sustava.



Slika 4.20. Čvrsto kućište spoja s tri prethodno oblikovana spoja iznutra (podaci ustupljeni od strane tvrtke ABB, Švedska) [13]

#### 4.5.1.3. Ostali dizajni spojeva

Podvodni energetske kabele koji su ispunjeni tekućinom zahtijevaju spojeve s neprekinutom cijevi unutar praznog vodiča. Često se koristi cjevasti omotač kako bi pružio podršku prije procesa zavarivanja. Za sprječavanje istjecanja tekućine, jezgre kabela se ohlade tekućim dušikom kako bi ostale u zamrznutom stanju.

Međutim, u određenim situacijama postoji potreba da se spriječi slobodno kretanje impregnirajuće tekućine kroz spoj, posebno u strmim dijelovima podvodnog kabela. Za takve scenarije koriste se spojevi s zaustavom, koji uključuju čvrsto zavareni vodič. Ovim se zatvara i unutarnja cijev za ulje i prostor između vodiča. Kako bi se spriječilo istjecanje ulja kroz izolaciju, koriste se konični epoksidni razdjelnici koji se umetnu u izolacijski zid. Ovi spojevi također sprečavaju nenamjerno premještanje bakrenih čestica zajedno s uljem.

Za povezivanje različitih tipova podmorskih kabela osmišljeni su brojni prijelazni spojevi. U nekim situacijama, kabele u podmorskim vezama imaju različite veličine vodiča kako bi se prilagodili različitim toplinskim uvjetima duž rute. Manje razlike u veličini često se kompenziraju pomoću fleksibilnih spojeva, dok se za veće razlike preferiraju čvrsti spojevi koji pružaju zaštitu od mehaničkog naprezanja, štetnog za osjetljive prijelaze visoko napregnute vodičke ovojnice.

Primjerice, u nekim projektima podvodnih 150 kV HVDC kabela koriste se bakreni vodiči za podmorski dio i aluminijski vodiči za kopneni dio (kao što su projekti Estlink i NordE.ON). Za povezivanje ovakvih različitih kabela koriste se specijalno izrađeni prefabrikovani spojevi s vijčanim konektorima od oba metala. Ovi prijelazni spojevi omogućuju povezivanje bakrenog vodiča podmorskog kabela veličine 1000 mm<sup>2</sup> s aluminijskim vodičem kopnenog kabela veličine 2000 mm<sup>2</sup>.

U određenim situacijama, kao što su podvodne HVDC kabelske veze, kabel blizu obale može biti ispunjen tekućinom, dok je podmorski kabel impregniran masom. U takvim scenarijima je moguće konstruirati prijelazne spojeve kako bi se povezali kabeli s različitim sustavima izolacije i različitim dizajnom vodiča. Prijelazni spojevi između kabela s izolacijom od papira i ekstrudiranim kabelima poznati su iz kopnenih primjena, no nije zabilježena njihova upotreba pod vodom.

Trifurkacijski spojevi koji povezuju trožilni kabel s troje jednožilnih kabela su poznati za kopnene primjene, no nije zabilježena njihova upotreba pod vodom. Vjerojatno su trifurkacijski spojevi korišteni kao spojevi na obali kako bi se povezali podmorski trožilni kabeli s kopnenim jednožilnim kabelima.

Raznovrsnost spojeva podmorskih kabela može izazvati određenu konfuziju. U tablici 3.4. su navedeni koncepti tih spojeva koji su opisani u nastavku, zajedno s njihovim ključnim svojstvima.

Tablica 4.2. *Primjena i svojstva različitih spojeva* [13]

Vrsta kabela	Fleksibilni spoj	Čvrsti spoj, izoliran trakom	Čvrsti spoj, prefabrikovani
Jednožilni maseno-impregnirani	Da, svi naponi	Da, ali bez prednosti	Ne
Jednožilni izolirani papirom	Mogući	Mogući	Ne
Jednožilni ekstrudirani	Do 145 kV, u nekoliko slučajeva 245 kV	Uobičajeno do 110 kV	Da
Trožilni izolirani papirom	Moguće	Da, ali bez prednosti	Ne
Trožilni ekstrudirani	Moguće	Da, ali bez prednosti	Da
Spoj vodiča	Samo zavaren	Samo zavaren	Zavaren, kompresija ili vijak
Potreba za posebnim rasporedom postavljanja na brodu za kabele	Ne	Da	Da
Prostor za optički spoj-kutija	Jednožilni kabel: ne	Trožilni kabel: da	Trožilni kabel: da

#### 4.5.1.4. Spojevi na kopnu

Ponekad se događa da se podmorski kabel direktno povezuje s nadzemnim vodom ili podstanicom na točki slijetanja. Međutim, često se ruta kabela nastavlja na kopnu. U takvim situacijama, spoj na kopnu između podmorskog i kopnenog kabela postaje nužan iz različitih razloga:

- **Udaljenost do obale:** U nekim slučajevima, završetak kabela je predaleko od obale da bi se podmorski kabel mogao povući sve do tog mjesta. U takvim situacijama, koristi se spoj na plaži kako bi se postigla potrebna duljina veze.
- **Termalni uvjeti:** Ponekad su termalni uvjeti na kopnu drugačiji nego pod vodom. To može rezultirati potrebom za većim promjerom vodiča na kopnu. No, dimenzioniranje cijelog

podmorskog kabela prema termalnim potrebama kraćeg dijela na plaži bilo bi nepotreban gubitak resursa.

- **Različiti tipovi kabela:** U mnogim projektima, podmorski kabel je s tri žile (3F), dok se kopneni kabelski sustav sastoji od tri pojedinačne žile. Kako bi se uskladila ta razlika, postavlja se prijelazni spoj na samoj obali.

Pri dizajnu i instalaciji spojeva na kopnu, potrebno je posvetiti posebnu pažnju. Važno je pažljivo odabrati mjesto za spoj na kopnu, ako postoji mogućnost izbora. U tu svrhu, izgradnja suhe kuće ili šatora za spajanje je nužna. Ovi objekti pružaju zaštitu od vjetrova, pijeska, soli i vlage te omogućavaju siguran proces spajanja. Idealno mjesto za to je na suhom dijelu obale, udaljenom od mjesta gdje valovi prskaju.

Ako je moguće, trebalo bi odabrati lokaciju iznad razine vode jer je lakše održavati suho okruženje u tom slučaju. Ako se spoj postavlja uz cestu, olakšava se transport opreme i smanjuje utjecaj na okoliš.

Izrada spojeva na kopnu u zoni prskanja valova nosi dodatne poteškoće. Za to se mora iskopati jama u blizini obalnog dna, koju je potrebno osigurati branom te osušiti. Krajevi kabela moraju biti pažljivo vođeni kroz zidove brane. Oprema i timovi koji rade na spoju također moraju imati suho i čisto okruženje kako bi osigurali kvalitetan rad. U nekim slučajevima, moguće je spoj izraditi na visokoj platformi kako bi se izbjegao kontakt s vodom. U oba slučaja, pripreme za rad postaju još zahtjevnije kada plimni tokovi dva puta dnevno ugrožavaju stabilnost opreme.

Slika 4.21 prikazuje područje spoja na kopnu za dvostruki HVDC ekstrudirani kabelski krug. U tom primjeru, dva para HVDC kabela povlače se s kopna kroz cijevi do kopna. Zaštitne cijevi su postavljene u uređaje na plaži koji su čvrsto pričvršćeni za betonski pod jame za spajanje.



Slika 4.21. Prikaz spojeva na kopnu za dva para ekstrudiranih HVDC kabela [13]

#### 4.5.2. Završeci kabela

Kada se podmorski kabel dovede do kopna, obično se povezuje (spaja) sa podzemnim kabelom koji se proteže blizu obale. Taj podzemni kabel se nastavlja sve do trafostanice, gdje se završava standardnim priključkom na kabelaške sisteme na kopnu. Bitno je naglasiti da ovaj kopneni priključak nije specifično dizajniran za podmorske kabele, već je namijenjen podzemnim kabelima. Lokacija trafostanice može varirati – može biti udaljena samo nekoliko metara od obale, ali i mnogo kilometara dalje.

##### 4.5.2.1. Priključci za izmjenične (AC) kabele na kopnu

Priključci za kabele na kopnu dijele slične karakteristike sa priključcima za podmorske i podzemne kabele u većini aspekata. Standardni priključci za izmjenične (AC) strujne podmorske kabele dostupni su od različitih proizvođača:

- Spojni priključci služe za spajanje kabela sa zračnim linijama ili šinskim vodovima u zračnim izoliranim trafostanicama. Izolatori se mogu izrađivati od porculana ili polimernih materijala. Dužina staze preko izolatora se određuje u rasponu od 25 do preko 40 mm/kV, a ta vrijednost zavisi od predviđenih opterećenja solju i nivoa zagađenja. Uz to, potrebno je obratiti posebnu pažnju na zaštitu metalnih dijelova priključka od korozije, s obzirom na moguće izloženosti solnim udarima blizu obale. Kako bi se povećala otpornost na koroziju metalnih dijelova, preporučuje se korištenje legura visoke otpornosti umjesto standardnih aluminijskih legura. Također, treba uzeti u obzir da mogu biti postavljeni stroži zahtjevi za vjetrovita opterećenja pri priključnicama koji se nalaze blizu obale.
- Priključci za povezivanje kabela sa gasom izoliranim prekidačima (GIS) omogućavaju vezu sa ovim specifičnim tipom prekidača. Ova vrsta priključaka za kabele je dobro poznata i široko primjenjiva čak i na veoma visokim naponskim nivoima GIS priključci se standardiziraju kako bi bili kompatibilni sa prekidačima različitih proizvođača. Osnova GIS priključka je konusni element koji se koristi za smanjenje napona na kraju izolacije kabela. Ovaj konusni element se umetne u konusnu prijemnicu unutar GIS komore. U nekim slučajevima, konusni element se savršeno uklapa u unutrašnjost konusne prijemnice (plug-in tip), čime se omogućava potpuno bezuljno rješenje. Alternative konstrukcije uključuju malu količinu dielektrične tečnosti kako bi ispunile prostor između konusnog elementa i unutrašnjosti konusne prijemnice.
- Priključci za transformatore su obično identični ili vrlo slični GIS priključcima. Međutim, kod podmorskih kabela ovi priključci se rijetko koriste, jer ljudi koji planiraju postavljanje

trafostanica obično preferiraju postavljanje prekidača između podmorskih kabela i transformatora.

#### 4.5.2.2. Priključci za istosmjerne (DC) kabele na kopnu

Do sada su za podmorske istosmjerne (DC) kabele razvijeni priključci samo za povezivanje u zraku. Kontrola napona u istosmjernim (DC) priključnicama zahtijeva upotrebu otpornih elemenata, budući da čisti kapacitivni elementi nisu adekvatni za istosmjerni napon. Dizajn ovih priključaka prilagođen je specifičnim karakteristikama podmorskih istosmjernih (DC) kabela.

Za ekstrudirane pomorske HVDC kabele do 150 kV, priključci su identični onima na kopnu za istu tehnologiju kabela. Ovi priključci koriste polimerni izolator i potpuno su bez ulja. Element za ravnanje polja u ovim priključcima je napravljen od otpornog materijala sa nelinearnom otpornošću. Ovaj materijal postaje provodljiviji pod većim električnim opterećenjem, što omogućava elementu za ravnanje polja da ublaži dijelove visokog napona unutar priključka.

Priključci za LPOF (kabeli sa polimerskim izolacijskim slojem ispunjeni vodom) kabele za istosmjernu (DC) upotrebu dizajnirani su veoma slično priključcima za izmjeničnu (AC) upotrebu. Međutim, konus za ravnanje napona i spojni izolator mogu imati drugačiji dizajn radi kontrole istosmjernog (DC) napona. Konus za ravnanje napona je napravljen od impregniranog papira, koji je prethodno oblikovan u tvornici ili oblikovan na licu mjesta tokom postavljanja priključka. Također, priključak predstavlja točku ulaska ulja u kabel.

Priključci za maseno impregnirane HVDC kabele su slični priključcima za LPOF kabele, osim sistema ubacivanja ulja. Dok priključak za LPOF kabele mora da „diše“ termički za čitavi kabel (ili bar za polovicu dužine), u sistemu sa masenom impregnacijom uljem, brine se samo o širenju male količine ulja unutar priključka. Za ovu svrhu, relativno mali rezervoar za širenje ulja zapremine nekoliko stotina litara je dovoljan i može se postaviti na postolje priključka bez potrebe za spojnim cijevima. (slika.4.22.)





Slika 4.22. Unutrašnji priključci za HVDC kabele, masom impregnirane kabele (lijevo) i ekstrudirane kabele (desno). Mali cilindar za spremnik ulja je pričvršćen za postolje lijevog priključka [13]

#### 4.5.2.3. Priključci za podmorske kabele

Podmorski energetske kabele koji su povezani sa offshore instalacijama poput platformi za proizvodnju nafte i plina ili vjetroparkova zahtijevaju specifične pristupe zbog zahtjevnog okruženja u kojem se nalaze. Otežavajući faktori kao što su nepovoljni klimatski uvjeti i ograničen prostor često ograničava upotrebu otvorenih priključaka samo na niskim naponskim nivoima. Kako bi se zaobišli ovi izazovi, kabele se često povezuju direktno sa inkapsuliranim prekidačima putem GIS priključaka, polimernih priključnih konektora ili priključaka za transformatore. Važno

je napomenuti da su ove komponente standardne komponente koje se također primjenjuju na kopnenim kabelima.

Međutim, kako bi se oduprle koroziji i osigurale usklađenosti sa proizvodnim i sigurnosnim standardima na platformi, ove komponente moraju biti posebno prilagođene. Standardi koji se primjenjuju na platformi mogu biti čak i stroži u usporedbi sa ekvivalentnim standardima na kopnu. Pored toga, proces postavljanja i instalacije ovih priključaka može biti podložan znatno strogim pravilima u usporedbi sa onima koji važe za instalacije na kopnu. Sve to ima za cilj osiguranje pouzdanosti i sigurnosti podmorskih energetske kabela u izazovnom okruženju offshore instalacija.

#### 4.5.3. Ostala dodatna oprema

Za postizanje strukturalne integracije i sigurnog pričvršćivanja podmorskih energetske kabela koristi se širok spektar dodatnih pribora. Sljedeći opisi pružaju samo osnovni pogled ovoga raznovrsnog skupa proizvoda.

##### 4.5.3.1. J-čelične cijevi (J-Tubes)

U industrijskoj praksi je uobičajeno usmjeriti energetske kabele prema stacionarnim platformama kroz J-čeličnu cijev (J- Tubes). Ove cijevi su nazvane po svom obliku koji podsjeća na slovo „J“. gornji dio J-a je smješten ispod ili iznad najniže platforme, dok donji otvor nazvan „Bellmouth“, ima oblik zvona i obično je usmjeren prema vanjskoj strani noge platforme. Položaj „Bellmouth“-a može biti ispod ili blizu morskog dna. Prilikom instalacije, kabel se provlači kroz „Bellmouth“ uz pomoć vučne žice. Radi glatke instalacije, polumjer luka „J-Tubes“ treba da bude značajni veći od minimalnog polumjer savijanja kabela, a promjer cijevi treba biti najmanje 2.5 puta veći od promjera kabela. U konstrukciju je često isplativije dodati dodatni materijal kako bi se olakšala instalacija kabela, umjesto suočavanja sa problemima tokom instalacije. Obično se u svakoj J-tubes postavlja jedan energetski kabel, mada se mogu koristiti i dva ili četiri kabela.

Iako većina J-Tubes cijevi ina otvoreno dno, neke su zatvorene kako bi oko kabela zadržavale antikorozivnu tekućinu unutar cijevi.

Posebna pažnja mora biti posvećena termalnim uvjetima kabela unutar cijevi. U J-Tubes je ispunjena vodom, konvekcija doprinosi prijenosu topline između kabela u unutrašnjeg zida cijevi.

Konvekcija zavisi od prstena koji se formira između kabela i zida cijevi i matematički je teško prevodljiva. Termalni uvjeti postaju izazovniji u gornjem dijelu J-Tubes koji je ispunjen zrakom, jer zrak može ostati zadržan unutar cijevi. Postavljanjem dovoljno velikih otvora na vrhu i dnu zračne kolone postiže se efekta dimnjaka koji poboljšava termalne uvjete. Međutim, otvori blizu oblasti izložene morskoj vodi mogu biti problematični zbog korozije.

Neki morski vjetroparkovi imaju centralne platforme koje sadrže ogromne J-Tubes za smještaj velikog broja ulaznih kabela iz pojedinačnih lanaca turbina. Ovdje može doći do gužve i povećane toplote.

#### 4.5.3.2. Vješanje (Hang-Off)

Težina vertikalno postavljenih kabela na stacionarnim ili plutajućim platformama se nosi uz pomoć sistema vješanja (Hang-Off). Vješanje predstavlja složen spojni element smješten između oplastene žice energetskog kabela i strukture platforme, kao što se može vidjeti na slici 4.23. Ovaj spojni element uključuje steznicu koja obuhvaća oplastenu žicu kabela kako bi zadržala mehaničko opterećenje. Jezgra kabela, koja sadrži olovnu ili bakrenu oplatu i zaštitni plastični omotač, prolazi kroz vješanje i nastavlja prema gornjem dijelu prema priključku kabela.



Slika 4.23. *Vješanje za trofazni kabel koji povezuje morską turbinu [13]*

#### 4.5.3.3.      *Zaštita od savijanja*

Kao i kod svakog fleksibilnog proizvoda, podmorski energetski kabel je podložan prekovremenom savijanju i zamoru kada postoji promjena u krutosti savijanja. Ova situacija može da se pojavi kada kabel ulazi u krutu spojnu kutiju, na ulazima u fiksne strukture poput vješanja ili priključnih kutija na plutajućim strukturama. Prekovremeno savijanje može da se desi, ili ponavljano savijanje može da dovede do ozbiljnog zamora unutar strukture kabela.

Savijajući pojačivači su elastomerni omotači postavljeni oko energetskog kabela blizu ulaska u krutu strukturu. Konusni oblik savijajućeg pojačivača postepeno povećava krutost savijanja,

pružajući glatku krivulju savijanja za fleksibilni kabel (Slika 4.24). Dizajn savijajućeg pojačivača mora biti prilagođen konkretnoj situaciji.

Ograničavač savijanja sastoji se od međusobno povezanih polimernih ili metalnih školjki koje obuhvaćaju kabel, omogućavajući određeni ugao savijanja za svaku školjku. Ograničavač definira minimalni polumjer savijanja bez obzira na opterećenje kabela. Međutim, zbog stepenaste krutosti savijanja koja se dodaje svojstvenoj krutosti kabela, i dalje može doći do promjene u krutosti. Nepravilan dizajn može samo predstavljati problem oštrog savijanja na kraju ograničavača savijanja.



Slika 4.24. Ograničavač savijanja (desna ruka) zajedno sa podmorskim priključkom bez potrebe za ronjenjem (lijeva strana) (podaci ustupljeni od strane Trelleborg, Velika britanija) [13]

#### 4.5.3.4. Uređaji za držanje

Različite stezaljke mogu se koristiti kako bi se pričvrstili podmorski energetske kabele duž obala, strmih podvodnih padina, područja s jakim strujama i drugih lokacija.

## 4.6. Ispitivanja

Tokom razvoja, kvalifikacije, proizvodnje i instalacije, podmorski energetske kabele su podvrgnuti temeljnim ispitivanjima. Ovi raznovrsni testovi služe različitim svrhama, ali imaju zajednički cilj - osigurati pouzdan rad pod specifičnim uvjetima.

Postoji obiman skup testova koji su povezani sa kablom, a oni se mogu klasificirati prema svrsi i fazi kvalifikacije, proizvodnje i instalacije kabela.

### 4.6.1. Razvojni testovi

Razvoj novih tipova podmorskih energetskih kabela ili proširenje postojećih tipova na nove veličine ili snage zahtjeva obimno testiranje materijala, komponenata i proizvodnih procesa. Mnogi novi materijali i koncepti prvo se razvijaju za podzemne kabele pre nego što se primjene na podmorske kabele. Ova praksa proizlazi iz činjenice da kvarovi na podmorskim kablomima mogu donesti značajno veće troškove popravke i produžiti vreme prekida u odnosu na iste kvarove na kopnenim kablomima.

Polimerna komponenta kabela stalno se unaprjeđuje. Nove formulacije polimera koje predstavljaju dobavljači moraju se procijeniti pod specifičnim uvjetima podmorskih energetskih kabela. Testovi dielektrične čvrstoće, gubitaka, curenja struje i dielektričnog odziva koriste se za karakterizaciju i selekciju izolacionih materijala. Često se ovi testovi izvode na uzorcima ili modelima kabela kako bi se izbjegla skupa proizvodnja kabela u punoj veličini. Starenje materijala se testira pri različitim temperaturnim i okolinskim uvjetima. Proces umrežavanja materijala procjenjuje se putem metoda koje mjere stupnja umrežavanja.

Podmorski kabele često se podvrgavaju testovima kako bi se provjerila njihova kvaliteta i izdržljivost. Ovi testovi uključuju ispitivanje polimernih omotača kako bi se provjerila njihova sposobnost zadržavanja vode, otpornost na slanu vodu, izdržljivost na habanje, prisutnost crnog ugljika i druge važne karakteristike.. Međutim, u većini slučajeva proizvođači koriste već dobro usklađene materijale omotača bez potrebe za promjenama.

Iako su većina svojstava metalnih komponenti navedena u tehničkoj literaturi, neka svojstva se ipak moraju procijeniti. Zamor materijala. osobine olovnih legura pažljivo se ocjenjuju putem

testiranja, uzimajući u obzir način proizvodnje. Također, ostali metalni omotači podvrgavaju se testovima zamora kako bi se osiguralo bezbrižno funkcioniranje tokom životnog vijeka kabela.

Druga grupa testova u fazi razvoja bavi se korozivnim performansama svih metalnih materijala u podmorskim kabelima. Metali se testiraju pojedinačno, ali i u relevantnim kombinacijama kako bi se istražilo galvansko ponašanje.

Mehanički testovi na cijelim podmorskim kabelima dizajnirani su da pokažu njihovu sposobnost da izdrže sve napore i događaje koji mogu nastati tokom instalacije i eksploatacije kabela. Ovi testovi uključuju naprezanja, savijanja, stiskanja, udare i druge faktore. Također je od suštinskog značaja razumjeti ponašanje pod uticanjem vanjskog hidrostatičkog pritiska za podmorske kabele.

S obzirom na jake i osjetljive tačke u dizajnu kabela i razumjevanije koji su testovi potrebni za uspješnu kvalifikaciju, svaki proizvođač ima svoj set testova koji prate tokom razvoja. Za brzo prethodno testiranje, ponekad se koriste skraćeni testovi koji mogu pružiti pouzdane rezultate u kratkom vremenskom periodu. To je posebno važno za testiranje starenja materijala kabela. Proizvođač kabela bi prvo podvrgao novi dizajn ovim preliminarnim testovima pre nego što ga podvrgne standardiziranim dugotrajnim kvalifikacionim testovima.

#### 4.6.2. Tipska ispitivanja

Nakon što je tip kabela razvijen ili prilagođen novim primjenama, obično se podvrgava standardnim testiranjima. S obzirom na to da mnogi veliki projekti podmorskih kabela zahtijevaju prilagođen dizajn, mnogi ugovori o nabavci također zahtijevaju provođenje standardnih testova. Međutim, budući da standardna testiranja značajno povećavaju troškove i vreme realizacije projekta, uvijek se mora razmotriti mogućnost da se dokaže da određeni dizajn kabela odgovara ciljevima projekta putem prethodnih standardnih testova na sličnim tipovima kabela.

Svrha standardnog testiranja je "kvalifikacija dizajna i proizvodnje kablenskog sistema prema predviđenim uvjetima" [13]. Uobičajeno testiranje električne opreme uglavnom se provodi po standardima za testiranje koje izdaju nacionalne agencije ili stručne organizacije kao što su IEEE, AEIC, ANSI ili Cigré. Većina ovih standarda za testiranje energetskih kabela obuhvaća samo podzemne kabele na kopnu, dok neki čak isključuju podmorske energetske kabele iz svog obuhvata. Kao rezultat toga, standardi za testiranje podmorskih energetskih kabela su rijetki. (Tablica 4.3.).

U praksi, često se standardna testiranja na podmorskim energetskim kabelima provode prema standardima za testiranje koji važe za slične podzemne kabele istog dizajna izolacije i veličine provodnika. Ovi standardni testovi uključuju ispitivanja materijala i električna ispitivanja, a ponekad čak i mehanička ispitivanja kao što su savijanja preko kabela na koturu.

Tablica 4.3 *Standardi tipičnih testova koji se mogu koristiti za podmorske energetske kabele* [13]

Norme	Objavljeno u	Naslov i sadržaj
Cigré	Electra br. 171, travanj 1997	Preporuke za mehanička ispitivanja na podmorskim kabelima U nastavku se navodi kao Electra 171
Cigré	Electra br. 189, travanj 2000, str. 29 i dalje	Preporuke za testiranje dugih izmjeničnih podmorskih kabela sa ekstrudiranom izolacijom za sistemski napon iznad 30 (36) do 150 (170) kV. Dalje se naziva Electra 189a
Cigré	Electra br. 189, travanj 2000, str. 39 i dalje	Preporuke za testiranje istosmjernih energetskih kabela za prijenos snage sa nazivnim naponima do 800 kV (svi tipovi izolacije osim ekstrudiranih). Dalje se naziva 189b
Cigré Tehnička brošura TB 219	Cigré Tehnička brošura 219, radna grupa 21.01., veljača 2003	Preporuke za testiranje DC ekstrudiranih kabelskih sistema za prijenos snage nazivnim naponima do 250 kV (obuhvaća podmorske kabele)
IEC 60840		Energetski kabele sa ekstrudiranom izolacijom i pripadajućom opremom za nazivne naponske vrijednosti iznad 30 kV ( $U_m=36$ kV) do 150 kV ( $U_m=170$ kV) – Metode ispitivanja i zahtjevi
IEC 62067		Energetski kabele sa ekstrudiranom izolacijom i pripadajućom opremom za nazivne naponske vrijednosti iznad 150 kV ( $U_m=170$ kV) do 500 kV ( $U_m=550$ kV) – Metode ispitivanja i zahtjevi



Preporuka Cigré objavljena u časopisu "Electra" br. 171 predstavlja jedini poznati standard testiranja koji opisuje relevantne mehaničke testove za podmorske energetske kabele. Ponekad specifikacije tipičnih testova uključuju mehaničke testove prema Electra 171, uz dodatak odgovarajućih elemenata tipičnih testova iz IEC standarda (za izmjenične struje) ili Cigré preporuka (za istosmjerne struje). Važno je napomenuti da tipični testovi obično nisu obavezni putem zakonodavstva. Uvjeti testiranja se često usklađuju tokom pregovora o ugovoru. Ovi standardi se najčešće koriste u većini evropskih projekata podmorskih kabela. U drugim tržištima mogu se primjenjivati različiti standardi tipičnih testova.

#### 4.6.2.1. Mehanička ispitivanja

Cigré preporuka za testiranje, koja je objavljena u časopisu "Electra" br. 171, iz travnja 1997. godine, predstavlja niz testnih postupaka specijalno osmišljenih za podmorske energetske kabele. Odluka o tome koje testove treba sprovesti ostaje na diskreciji kupca.

Tablica 4.4. Električni tipični testovi za pet generičkih tipova kabela [13]

Vrsta kabela br.	1	2	3	4	5
Nazivni napon $U_0$	33 kV AC	150 kV AC	420 kV AC	150 kV DC	450 kV DC
Izolacija	XLPE	XPPE	Papir/ulje	Polimer	Maseno impregnirana
Mehanički testovi			Electra 171		
Električni tipični test	Electra 189a sa referencom na IEC 60840	IEC 60840	IEC 62067	Cigré tehnička brošura TB 129	Electra 189b
Sekvenca testiranja	TB PD Tan $\delta$ HC PD LI AC (PD) (isto kao u IEC 60502)	TB PD Tan $\delta$ HC PD LI AC (PD)	TB PD Tan $\delta$ HC PD SI (za $U_{m\theta} \geq 300$ kV) LI AC (PD)	TB LC SI LI & DC DC	TB LC PR LI SI

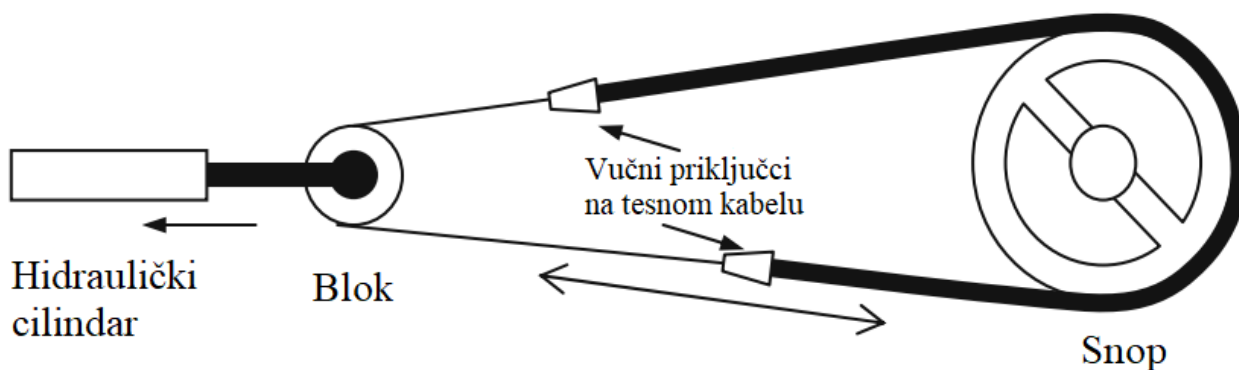
Skraćenice:

- TB, test savijanja pri naprezanju;
- WP, test prodora vode;
- PD, test parcijalnog pražnjenja;
- HC, test napona tokom ciklusa grijanja;
- LI, test udara groma; SI, test prekida struje;
- LC, test ciklusa opterećenja;
- PR, test obrtanja polariteta;
- DC, test visokim naponom sa istosmjernom strujom;

- AC, test visokim naponom sa izmjeničnom strujom.

Ti testovi su dizajnirani za kabele koji će se namotavati tokom procesa proizvodnje, utovara ili instalacije. Ovi testovi imaju za cilj potvrditi da je kabel prikladan za namotavanje uzimajući u obzir parametre koji se javljaju tokom rukovanja kabelom. Iako promjer namotavanja nije specifično naveden u Electra 171, test treba potvrditi vrijednost koju je odredio proizvođač. Testni kabel mora biti dovoljno dug kako bi se postigao odgovarajući broj namotaja i kako bi se isključili efekti krajeva kabela.

Test naprezanja savijanja prema Electra 171 procjenjuje sposobnost kabela da izdrži naprezanja koja se javljaju uslijed kombinacije napona i savijanja preko točka za polaganje tokom instalacije. Ovaj test se izvodi na kabelu prije nego što se izvedu električni testovi na istom komadu kabela. Ovaj test može obuhvatiti i fleksibilne spojnice koje su dio testnog kabela. Konkretno, testni kabela se postavlja na pola puta oko velikog kola koji predstavlja točak za polaganje na brodu za polaganje kabela. Na krajeve kabela primjenjuje se vučna sila dok se kabel tri puta kreće naprijed-nazad oko točka za polaganje. Promjer točka za polaganje obično iznosi 6 ili 10 metara, što je u skladu s tipičnim promjerima kotača za polaganje na postojećim brodovima za polaganje kabela (vidi sliku 4.25).



Slika 4.25. Ispitni raspored za ispitivanje vlačnim savijanjem prema Electra br. 171., Pogled odozgo [13]

Test vučne sile definiran je u Electra 171 ovisno o težini kabela u vodi i dubini vode. Za dubine veće od 500 m, uključene su i dinamičke sile uzrokovane pokretima valova. Iskustvo je pokazalo da stvarne vučne sile na kotaču za polaganje mogu značajno premašiti sile navedene u Electra 171, ovisno o vremenskim uvjetima tijekom polaganja.

Za mnoge podmorske projekte prijenosa, dubina polaganja je ispod 100 m, što rezultira prilično umjerenim testnim silama prema preporuci Cigré-a. Ponekad je potrebna vučna sila tako mala da teški kabel čak nije potpuno ravan, već ima značajno savijanje tijekom testa. Testovi s preporučenim Cigré silama za dubinu polaganja manju od 100 m često nemaju praktičan značaj. Kupac i proizvođač trebali bi razmotriti dogovor o izostavljanju testa kako bi se uštedjeli troškovi.

Test naprezanja savijanja potvrđuje projektne vrijednosti čvrstoće pod naprezanjem i tlaka na bočnoj strani (SWP), odnosno jednolateralne sile na stranu kabela po jediničnoj duljini. Tijekom instalacije moguće su i druge mehaničke napetosti, poput lokalnog bočnog udara od strane podloške gusjeničara ili kotača strojeva za kabliranje, ili naprezanja uzrokovanih strojevima za ukopavanje. Također, transport kabela preko zakrivljenih rolo staza ili kabelskih mostova nije obuhvaćen preporukama za testiranje Cigré-a, osim ako su valjci na mostu vrlo blizu jedan drugome i imaju dovoljno velik promjer. Za ovu vrstu udara još nisu razvijeni tipični testovi. Budući da se uvjeti instalacije i oprema znatno razlikuju između projekata, nije moguće konstruirati tipične testove koji obuhvaćaju sve vrste udara. Umjesto toga, proizvođač, kupac i instalater trebali bi se složiti o potrebi i prirodi dodatnih testova za potvrdu.

Electra br. 171 također preporučuje unutarnji test tlaka za kabele podmorskih punjenih uljem i plinom.

Vrlo poseban test preporučen u Electra br. 171 je test ispitivanja na moru u slučajevima gdje se uvjeti polaganja razlikuju od prethodno izvedenih operacija. Za test ispitivanja na moru potrebno je predvidjeti opremu za polaganje (brod, oprema na brodu i posada ako je moguće) kako bi se položio i povukao značajan dio podmorskog kabela na dnu mora koji je reprezentativan za ciljano područje. Testovi su vrlo skupi, ali mogu otkriti moguće nedostatke u dizajnu kabela i opreme za instalaciju. Loša oprema ili dizajn kabela koji nije prikladan za metodu instalacije mogu uzrokovati ogromne troškove ako se otkriju tijekom instalacije kabela. U najgorem slučaju, instalacija mora biti prekinuta, a oprema nadograđena ili obnovljena. Daleko je jeftinije to učiniti na dobro isplaniran način nakon testa ispitivanja na moru prije kampanje instalacije. Prepoznajući to, mnogi veliki projekti podmorske energije izveli su testove ispitivanja na moru i koristili rezultate u korist projekta.

#### 4.6.2.2. Ispitivanje opterećenja

Testovi ciklusa opterećenja sastavni su dio tipičnih testova koje se provode na svim podmorskim energetskim kabelima. Za izmjenične struje (AC), električni testovi obično se izvode prema istim specifikacijama kao i za podzemne kabele. Međutim, postupci testiranja ciklusa opterećenja za istosmjernu struju (DC) manje su poznati i bit će opisani u nastavku.

Preporučeni test ciklusa opterećenja za HVDC kabele s masenom impregnacijom opisan je u Electra 189b. Ovaj test podrazumijeva 24-satni ciklus opterećenja koji uključuje osmosatno razdoblje pod punim opterećenjem kabela, nakon čega slijedi 16-satno razdoblje prirodnog hlađenja. Konkretno, Electra 189b test ciklusa opterećenja obuhvaća deset ciklusa opterećenja, pri čemu je svaki karakteriziran konstantnim negativnim naponom od  $-1.8 \times U_0$ . Nakon toga, provodi se još deset ciklusa s pozitivnim naponom od  $1.8 \times U_0$ . Temperatura okoline tijekom testa treba se dogovoriti između proizvođača kabela i kupca. Ovisno o uvjetima na dnu mora, testovi se mogu specificirati s različitim temperaturama okoline kako bi se uzeli u obzir različiti toplinski uvjeti i sezone. Za kabele instalirane na dnu mora u umjerenim vodama, najniža očekivana temperatura okoline iznosi otprilike  $6^\circ\text{C}$  tijekom razdoblja neaktivnosti kabela, dok temperatura može doseći preko  $30^\circ\text{C}$  nakon produljenog prekida neprekidnog prijenosa energije. U tropskim vodama, temperatura okoline bila bi drugačije specificirana. Ako je kabel instaliran unutar crijeva ili cijevi s kontroliranom temperaturom, lako se mogu napraviti prilagodbe temperature okoline testnog kabela. Amplituda porasta struje grijanja trebala bi odražavati nazivno opterećenje kabela i također je predmet dogovora.

Određujući faktori koji upravljaju radom kabela s masenom impregnacijom HVDC-a su temperatura vodiča i pad temperature preko izolacije. Tijekom tipičnog testiranja, moguće je neovisno postaviti samo tri od sljedeća četiri parametra:

- Temperatura vodiča
- Pad temperature preko izolacije
- Struja vodiča
- Temperatura okoline

Osmosatno/šesnaestosatni ritam ciklusa široko je prihvaćen jer se dobro uklapa u radni dan. S obzirom na to da termalna vremenska konstanta takvih kabela iznosi 1 do 2 sata, upotreba kraćeg ciklusa hlađenja/grijanja i dalje bi adekvatno zagrijala kabel. Za razvojne testove, prihvatljiv je skraćeni slijed od četiri sata hlađenja i osam sati grijanja.

Što se tiče testnog napona, potrebno je dodatno pojasniti. Iako je test ciklusa opterećenja za maseno impregnirane HVDC (Visokonaponski istosmjerni sustav) kabele opisan u publikaciji Electra 189b, specifični uvjeti testa često se prilagođavaju tijekom pregovora o ugovoru. Electra 189b propisuje testni napon od  $1,8 \times U_0$ , gdje je  $U_0$  radni napon HVDC kabela. Međutim, u posljednjim godinama, proizvođači i kupci kabela često se slažu s nižim faktorima testnog napona, posebno za fazu hlađenja testa ciklusa opterećenja. To je zato što je dielektrična čvrstoća tijekom faze opterećenja tipskog testa (s punim strujama) i u većini operativnih scenarija znatno veća nego tijekom faze hlađenja tipskog testa.

Dimenzioniranje HVDC kabela isključivo radi ispunjenja jednog testnog parametra bilo bi nepraktično. Za maseno impregnirane HVDC kabele proizvedene tijekom posljednjih 15 godina, faktori testnog napona od  $1,55 \times U_0$ ,  $1,6 \times U_0$  ili  $1,7 \times U_0$  su specificirani od strane kupaca za fazu hlađenja.

Tijekom tipskog testa, kabel je završen s uljem ispunjenim kabelskim završecima pod tlakom. Sprječavanje ulaska ulja iz tih završetaka u kabel ključno je tijekom tipskog testa, budući da bi ta umjetna situacija mogla omogućiti kabelu da prođe test, što ne odražava uvjete u stvarnom životu koji se odvijaju na nekoj udaljenosti od mjesta završetaka. Različite metode mogu se koristiti za sprječavanje protoka ulja, kao što su korištenje dužih kabelskih veza između završetaka i dijela kabela koji se testira, zamrzavanje segmenta kabela između završetaka i dijela kabela koji se testira ili implementacija brtvenih aranžmana unutar završetaka.

Nakon ciklusa opterećenja koji uključuje i pozitivne i negativne naponske vrijednosti, sljedeći korak je test obrtanja polariteta. Ciklus opterećenja od 8/16 sati ostaje isti, ali napon se periodično mijenja između  $+1,4$  puta  $U_0$  i  $-1,4$  puta  $U_0$  svakih 4 sata. Taj postupak se ponavlja deset potpunih ciklusa opterećenja. Iako Electra 189b predlaže brzinu obrtanja manju od 2 minute, stvarni testovi su koristili dulje vrijeme obrtanja zbog ograničenja opreme u laboratoriju ili zbog aspekata prijenosnog sustava koji ne zahtijevaju tako brze promjene polariteta. Nakon testova obrtanja polariteta, kabel se podvrgava impulsnom ispitivanju.

Za ekstrudirane HVDC kabele, koji su osvojili znatan udio tržišta podmorskih HVDC kabela, tehnička brošura Cigré 219 opisuje test ciklusa opterećenja. Za kabele dizajnirane za izvore napona, tj. bez promjena polariteta, TB 219 preporučuje određeni slijed testova ciklusa opterećenja (detaljno naveden u Tablici 4.5.).

Tablica 4.5. *Slijed testiranja ciklusa opterećenja za ekstrudirane HVDC podmorske kabele prema Cigré tehničkoj brošuri 219.*

Karakteristike ciklusa opterećenja	Broj ciklusa
8/16 h ciklusi opterećenja pri $- 1.85 \times U_0$	12
8/16 h ciklusi opterećenja pri $+1.85 \times U_0$	12
24/24 h ciklusi opterećenja pri $+1.85 \times U_0$	3

Za ekstrudirane HVDC kabele koji se kvalificiraju za pretvarače s linijom komutacije (tzv. "Klasične" pretvarače), definiran je drugačiji skup ciklusa opterećenja, uključujući testove obrtanja polariteta. Zbog karakteristika ekstrudirane izolacije istosmjernog toka, smanjenje testnog napona tijekom faze hlađenja, kao što je to slučaj kod maseno impregniranih HVDC kabela, dosad nije preporučeno.

TB 219 zahtijeva provedbu niza neelektričnih testova prije testova ciklusa opterećenja. Ti testovi uključuju ispitivanja savijanja (ovisno o primjeni pod morom ili pod zemljom) i ispitivanja vodonepropusnosti, s referencom na druge IEC ili Cigré standarde za testiranje. Nakon testova ciklusa opterećenja, kabel se podvrgava ispitivanju impulsa.

#### 4.6.2.3. Impulsni (udarni) testovi

Impulsna ispitivanja su sastavni dio većine standarda za ispitivanje tipa. Rano je postalo jasno u oblasti elektroenergetike da ispitivanja izmjenične struje (AC) i istosmjerne struje (DC) sami po sebi ne pokrivaju sve događaje u životu komponenti u elektroenergetskom sistemu. Dielektrična čvrstoća svake izolacije značajno zavisi od oblika i trajanja naponskog vala. Impulsna ispitivanja su neophodna kako bi se demonstriralo ponašanje komponenata pod privremenim prenaponima.

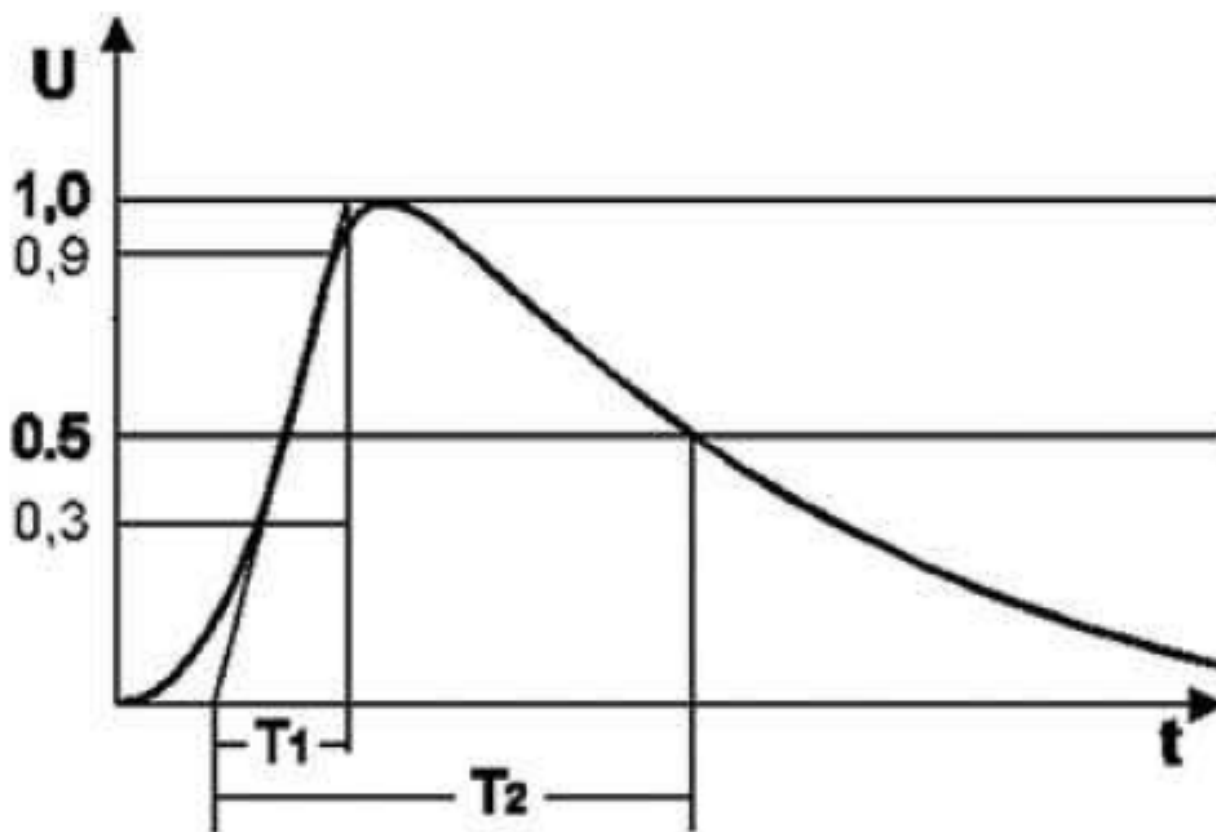
Ova ispitivanja se sprovode prema odgovarajućim IEC standardima za opremu visokog napona u prijenosu električne energije. Što se tiče ostalih visokonaponskih kabela, standardi ispitivanja specificiraju ispitivanja munjevitog impulsa i često i ispitivanja prekidačkog impulsa za podvodne kabele. Usprkos nazivima, ova ispitivanja ne moraju nužno da liče na stvarno prebacivanje ili munjeviti udar. Razlika između prebacivanja i munjevitih impulsa može se napraviti na osnovu oblika talasa, a ne na osnovu njihovog porekla. Oblici talasa su navedeni u IEC 60060-1 u smislu trajanja uspona ( $t_1$ ) i vremena do polovine vrijednosti ( $t_2$ ). Standardni munjeviti impuls (LI) ima

vrijeme uspona od  $1,2 \mu\text{s}$  ( $t_1$ ) i vreme do polovine vrijednosti od  $50 \mu\text{s}$  ( $t_2$ ) nakon vrha. Za standardni prekidački impuls (SI), ove vrijednosti su  $250 \mu\text{s}$  i  $2500 \mu\text{s}$ , redom. IEEE definira  $1,4/40 \mu\text{s}$  kao parametre oblika talasa za LI. IEC i IEEE koriste nešto drugačije formule za određivanje  $t_1$  i  $t_2$  na osnovu oblika talasa. Slika 4.26 prikazuje idealan oblik impulsa. Međutim, laboratorijski zapisi obično ne liče na ovakav oblik, i procjena parametara ispitivanja (vreme uspona, vreme do polovine vrijednosti) je sve samo ne jednostavna. Računarski algoritmi pomažu u identifikaciji parametara iz iskrivljenih zapisa sa interferencijama i nadovezujućim oscilacijama.

Originalno su parametri ispitivanja impulsa osmišljeni da liče na pojave u zračno izoliranim električnim mrežama i podstanicama. Danas je situacija drugačija za mnoge završetke podvodnih kabela. HVDC kabele su povezani sa pretvaračkim stanicama gdje određeni tipovi prenapona možda uopće neće nastati ili će se javiti samo sa manjim amplitudama u usporedbi sa zračnim izoliranim AC podstanicama. Drugi moderni podvodni kabele za napajanje, kao što su oni koji se koriste u HVDC pretvaračima ili aplikacijama van obale, imaju svoje završetke u zatvorenim prostorima.

Tipična ispitivanja za AC podvodne kabele uključuju impulsna ispitivanja prema odgovarajućim standardima za kopnene kabele sa odgovarajućim prilagodbama. Što se tiče DC kabela, Cigré preporuke uključuju ispitivanja impulsa sa nadovezujućim DC naponom.





Slika 4.26. Standardni impuls oblika napona [13]

Za HVDC kabele izolirane papirom, sprovodi se deset pozitivnih impulsa munje superponiranim preko negativnog istosmjernog napona, zatim deset negativnih impulsa munje superponiranim preko pozitivnog istosmjernog napona. Isti slijed primjenjuje se i za sklopne impulse. Na ovaj način se kompletira ispitivanje električnog tipa za HVDC kabele izolirane papirom.

Prema Cigré Tehničkom izvještaju (TB) 219, ekstrudirani podmorski HVDC kabelski sustavi prolaze kroz složen uzorak ispitivanja sklopničkih impulsa sa suprotnim ili paralelnim polaritetom. Ispitivanje impulsa munje može biti izuzeto pod određenim okolnostima.

#### 4.6.3. Rutinski testovi

Rutinska ispitivanja se provode na svim proizvodnim dužinama i/ili dužinama isporuke. Različiti standardi ispitivanja koji se primjenjuju za podmorske energetske kabele imaju različite propisane sekvence rutinskih testova. Gotovo svi standardi zahtijevaju ispitivanje otpora vodiča, izolacijskog kapaciteta i kuta gubitka  $\tan \delta$ . Otpor i kapacitet se mogu mjeriti na cijelom kabelu (na primjer, na dužini kotura) ili na krajevima koji su odvojeni od dužeg kabela. Mjerenje otpora zahtijeva poznavanje temperature vodiča. Za kratke ispitne komade, koristi se metoda četiri točke za mjerenje otpora. Razmak između kontakata izvora struje na vodiču i naponskih sonda treba biti

dovoljno dug da omogući ravnomjerno raspoređivanje struje u vodiču. Ako se ispitivanje otpornosti provodi na proizvodnim dužinama koje premašuju traženu vrijednost, treba provjeriti ima li očekivanih žarišnih točaka duž trase kabela za koje su takve dužine određene. Ako takvih točaka nema, ukupni otpor trase kabela može se prilagoditi dodavanjem malo površine vodiča ostalim proizvodnim dužinama.

Ispitivanje kapaciteta ima svrhu provjere da izolacija nije preslaba. Prema IEC standardima, navedena vrijednost ne smije prekoračiti 8%. Kut gubitka  $\tan \delta$  se prikladno mjeri na isječenom komadu kabela u proizvodnoj dužini. IEC standardi zahtijevaju mjerenja pod izmjeničnim naponima koji odgovaraju električnom naprezanju u izolaciji od 2 do 8 kV/mm. Mjerenje se može provesti primjerice pomoću visokonaponskog Scheringovog mosta. Detaljne metode mjerenja  $\tan \delta$  i njihova teorija mogu se pronaći u literaturi. Granične vrijednosti su navedene za  $\tan \delta$  na oba napona i za razliku između tih rezultata. Američki AEIC standardi specificiraju faktor ionizacije, IF, koji je razlika između  $\tan \delta$  na 100 V/mil (=3,9 kV/mm) i 20 V/mil (=0,8 kV/mm). Vrijednost IF ne smije biti veća od 0,1% za LPOF kabele. Visoke vrijednosti  $\tan \delta$  mogu ukazivati na kontaminiranu izolaciju, što dovodi do visokog istjecanja struje kroz izolaciju. Vrijednost  $\tan \delta$  također može rasti zbog djelomičnih pražnjenja u izolaciji, što rezultira integriranom strujom.

#### 4.6.3.1. Visokonaponska rutinska ispitivanja

Proizvodne duljine često su podvrgnute rutinskom ispitivanju visokog napona prema zahtjevima standarda, dogovoru ili kao interno ispitivanje proizvođača (vidljivo u Tablici 4.6). Očigledan razlog za to je eliminiranje neispravnih kabelskih jezgri iz daljnjih skupih koraka proizvodnje. Napon faktora naveden u standardima razlikuju se za različite vrste kabela i mogu se prilagoditi u skladu s naručiteljem.

Jezerce modernih podmorskih energetske kabela može se proizvesti u znatno dugim duljinama, poput 20 km ili više. Tvorničko ispitivanje ovih dugih kabelskih jezgri s izmjeničnim naponom zahtijeva značajnu ispitnu snagu kako bi se osigurala struja punjenja. U mnogim slučajevima, ovo prelazi mogućnosti AC generatora ispitnog napona. Veća ispitna snaga može se postići pomoću rezonantnih krugova gdje se induktivitet podešava tako da formira rezonantni krug s kapacitetom ispitivanja kabela. Frekvencija ispitivanja u rezonanci često je između 30 i 300 Hz.

Ispitivanje s istosmjernim (DC) naponom, na primjer za HVDC kabele, zahtijeva punjenje kapacitivnosti kabela do navedenog napona. Struja punjenja od strane DC ispitnog generatora je

ograničena i može potrajati značajno vrijeme da bi se postigao željeni napon. Napunjeni kapacitet kabela zadržava veliku količinu energije. Strogo kontroliranje ispitnog raspona je od ključne važnosti u slučaju oslobađanja energije pri prekidu. U slučaju neuspjeha ispitivanja, količina pohranjene energije može brzo izazvati eksploziju porculanskog izolatora.

Tablica 4.6. AC ispitni naponi za rutinska ispitivanja i ispitivanja nakon instalacije na izmjeničnoj (AC) struji kabela [13]

Norme	Nazivni napon kV	$U_0$ kV	Rutinski ispitni napon (faza-zemlja), kV	Nakon instalacije ispitni napon (faza-zemlja), kV
IEC 60605	30	18	63	30 (5 min) ili 18 (24 h)
IEC 60840	45 - 47	25	65	52
	60 - 69	36	90	72
	110 - 115	64	160	128
	132 - 138	76	190	132
	150 - 161	87	218	150
IEC 62067	220 - 230	127	318	180
	275 - 287	160	400	210
	330 - 345	190	420	250
	380 - 400	220	440	260
	500	290	580	320

#### 4.6.4. Tvornički prijemni testovi (FAT - Factory Acceptance Tests)

Potvrda uspješne instalacije podmorskog kabela bez oštećenja postiže se naknadnim izvođenjem ispitivanja cijelog kablenskog spoja, uključujući spojeve i završetke (vidljivo u Tablici 4.7). Slično kao i kod ispitivanja tvorničkog ispitivanja na prijemnoj stanici (FAT), ova ispitivanja se izvode

kao visokonaponska ispitivanja, bilo izmjeničnom strujom ili istosmjernim naponom. Međutim, nije uvijek jednostavno dovesti izvore visokog napona na mjesto instalacije.

Istosmjerni (DC) generatori ispitnog napona relativno se lako mogu transportirati putem kamiona. Ovi generatori su često dizajnirani za upotrebu u zatvorenim laboratorijskim okruženjima te bi ih trebalo koristiti samo u zatvorenim prostorima ili pod suhim vremenskim uvjetima. Magla i rosa mogu narušiti unutarnju izolaciju ispitne opreme. Ponekad se privremena skloništa podižu kako bi se zaštitila oprema od nepovoljnih vremenskih uvjeta.

Vrijeme ispitivanja, posebno kod dugih podmorskih kablskih veza, može biti značajno produženo zbog kapacitivnog punjenja kabela. U nekim nedavnim vrlo dugim HVDC projektima, vrijeme ispitivanja pri napetosti od  $1,4 \times U_0$  (napon iznad nazivnog napona) trajalo je samo 30 minuta, dok je ukupno trajanje ispitivanja iznosilo 11 sati zbog vremena potrebnog za punjenje i pražnjenje kabela. Otprilike pet sati od tog ukupnog vremena napon je bio iznad nazivnog napona ( $U_0$ ).

Tablica 4.7. Ispitni naponi za rutinska ispitivanja i ispitivanja nakon instalacije [13]

Vrsta kabela br.	1	2	3	4	5
Nazivni napon $U_0$	33 kV AC	150 kV AC	420 kV AC	150 kV DC	450 kV DC
Izolacija	XLPE	XLPE	Papir/ulje	Polimer	Maseno impregnirani
Primjenjivi standard	Electra 189a s referencom prema IEC 60840		IEC 62067	Cigré TB (Technical Brochure) 219	Electra 189b
Rutinski ispitni napon	-	218 kV	440 kV	$1.85 \times U_0 =$ -278 kV DC	$1.8 \times U_0 =$ -810 kV DC
Nakon ugradnje ispitni napon	-	150 kV	260 kV	$1.45 \times U_0 =$ -218 kV DC 15 min	$1.4 \times U_0 =$ -630 kV DC 15 min

Testiranje dugih kablskih veza visokonaponskom izmjeničnom strujom (AC) zahtijeva značajne struje punjenja. Potrebna snaga za ispitni krug je proporcionalna kapacitetu kabela i kvadratu ispitnog napona. Za mnoge kablške veze, ispitivanje AC strujom zahtijevalo bi ispitnu snagu koja premašuje kapacitet većine visokonaponskih ispitnih transformatora.

Jedna alternativna strategija za ispitivanje AC kabela je povezivanje s elektroenergetskom mrežom tijekom 24 sata. Ovaj pristup, poznat kao "soak test" ili ispitivanje potapanjem, ne zahtijeva teške ispitne transformatore. To je česta metoda, posebno za visokonaponske AC kabele. Standard IEC 60840 također prepoznaje ovu metodu.

Važno je napomenuti da "soak test" ne obuhvaća ispitivanje pod povišenim naponima. Druga strategija uključuje uporabu istosmjernog (DC) napona za ispitivanje AC kabela. Ovaj pristup omogućava korištenje jednostavnije ispitne opreme. Međutim, nije uvijek pouzdano da se skrivene greške u kablskom sustavu mogu otkriti primjenom istosmjernog napona. Zapravo, mnogi stručnjaci se slažu da ispitivanje istosmjernim naponom može više naškoditi nego koristiti, potencijalno pogoršavajući izolaciju.

Trenutno se uporaba ispitivanja istosmjernim naponom na AC podmorskim kabela rijetko primjenjuje i nije tako široko prihvaćena.

Duge i izuzetno duge kablške veze mogu se testirati pri povišenim naponima pomoću serijskih rezonantnih krugova. U ovakvim ispitnim krugovima, induktivnost je spojena s kapacitetom kabela kako bi se formirao rezonantni krug. Uz pomoć uzbudnog transformatora, napon se primjenjuje na rezonantni krug u kojem se izmjenični napon održava rezonancijom između kapaciteta kabela ( $C_{cable}$ ) i vanjske induktivnosti ( $L_{external}$ ). Kriterij rezonancije definira se kao:

$$C_{cable} \times L_{external} = \frac{1}{(2\pi f)^2} \quad (4.1.)$$

Gdje  $f$  označava frekvenciju napajanja. U nekim komercijalnim serijama rezonantnih krugova, kriterij rezonancije se postiže putem podesivog vanjskog induktiviteta pri konstantnoj frekvenciji, dok drugi sustavi koriste podesivu frekvenciju pri konstantnoj vanjskoj induktivnosti. Sustavi s podesivom frekvencijom smatraju se boljim u smislu omjera snage i težine, što je posebno važno s obzirom na potrebni induktivitet. Frekvencija napajanja obično je unutar raspona od 30 do 300 Hz.

Neki komercijalni sustavi za ispitivanje su izgrađeni modularno, što znači da se može dodati više induktivnosti kako bi se zadovoljio veći kapacitet kabela kod vrlo dugih podmorskih kabela. Raspravlja se o širem rasponu frekvencija u kontekstu budućih standarda ispitivanja.

Rezonantni krug koji se sastoji od kabela i vanjske induktivnosti ima određene gubitke. Tijekom svakog ciklusa titranja između kapaciteta i induktivnosti, određena količina energije se rasipa, uglavnom u omskim komponentama kruga, kao što su kabelski vodič i ekran. Ovi gubici moraju biti nadoknađeni putem uzbudnog transformatora i mogu ograničiti maksimalnu duljinu ispitnog kabela. Duljina kabela koja se može testirati može biti znatno veća od 100 km, ovisno o kapacitetu kabela, ispitnom naponu, konfiguraciji sustava i željenom trajanju ispitivanja. Dobavljači ispitnih sustava obično pružaju točne podatke u svojim specifikacijama sustava.

Ovisno o potrebnom izmjeničnom ispitnom naponu i kapacitetu kabela, može biti potrebno otpremiti jedno ili više vozila opreme na mjesto ispitivanja. Metoda je izvediva za podmorske kabelske veze gdje je barem jedan kraj kabela lako dostupan na mjestu spajanja. Međutim, za iznimno velike podmorske kabele moguće je da bi bilo potrebno nerazmjerno velike količine induktivnosti kako bi se postigao ovaj zadatak.

Prema američkom standardu ICEA br. S-57-401/NEMA Standards Publication No. WC2, preporučuje se provođenje ispitivanja visokog napona nakon instalacije za armirane kabele. Prema ovom standardu, koristi se 80% ispitnog napona koji je korišten pri ispitivanju armiranog kabela u tvornici. Za ekvivalentni kabel bez armature, preporučuje se korištenje 64% ispitnog napona koji je korišten pri tvorničkom ispitivanju.

#### 4.6.5. Neelektrični testovi

Različiti standardi ispitivanja propisuju niz neelektričnih ispitivanja uz električna ispitivanja. Ta ispitivanja se provode kao uzorci u definiranom postotku proizvodnje, kao rutinska ispitivanja za svaku proizvodnu seriju ili kao dio tipskih ispitivanja. Glavna svrha ovih testova je potvrditi da fizička svojstva proizvedenih kabela odgovaraju zadanim specifikacijama.

Raznolik niz neelektričnih ispitivanja naveden je u različitim ispitivačkim standardima i obično se izvode u različitim intervalima i situacijama. Dati sveobuhvatan sažetak ovih ispitivanja gotovo je nemoguće.

Mnogi neelektrični testovi uključuju dimenzijske provjere kao što su debljina sloja izolacije ili ekscentričnost vodiča. Druge specifikacije ispitivanja uključuju električni otpor poluvodičkog materijala ili jednostavno brojanje žica u vodiču. Materijalna svojstva se često provjeravaju prije i nakon procesa starenja. Ispitivanja na materijalima podvrgnutim povišenim temperaturama provjeravaju kvalitetu umrežavanja.

Neki od ovih testova su navedeni u međunarodnim ispitnim standardima, dok drugi mogu biti definirani od strane distribucijskih kompanija ili biti dio uobičajene prakse u određenim zemljama. Ovi neelektrični testovi često nisu tako istaknuti kao električni testovi. Zbog toga, te činjenice da postoji mnogo različitih specifikacija testova, preporučuje se jasno definirati niz neelektričnih ispitivanja unutar okvira projektnog ugovora kako bi se izbjegla konfuzija.

## **5. ELEMENTI IZVEDBENOG PROJEKTA PODMORSKOG KABELSKOG VODA 110 kV**

Za primjer izvedbenog projekta odabrali smo projekt zamjene podmorskog kabela snage 110 kV, koji služi za povezivanje kopna i jednog od otoka. Osnovna svrha ovog projekta jest osigurati stabilnu i pouzdanu opskrbu električnom energijom na otoku zamjenom postojećeg kabela koji je prvotno postavljen 1972. godine i s vremenom je postao nepouzdan zbog svog starosti i dotrajalosti. Ovom zamjenom kabela cilja se poboljšati sigurnost u opskrbi električnom energijom otoka te omogućiti neprekidno napajanje električnom energijom [29].

Projekt obuhvaća ne samo zamjenu podmorskog kabla već i polaganje podzemnog kabla na kopnenim dijelovima. To uključuje postavljanje podzemnog kabla od otoka do kabelačke kućice s ukupnom duljinom od 270 metara, kao i na kopnenoj dionici uz desni nasip potoka koja ima duljinu od 1190 metara. Te kopnene dionice kabela povezuju se s podmorskim kabelom koji ima duljinu od 4065 metara. Ukupna duljina svih položenih kabela iznosi 5525 metara [29].

Podzemni kabel se polaže u kabelački rov koji ima oblik trapeza. Rov ima dubinu od 115 centimetara, širinu od 80 centimetara na dnu i 140 centimetara na površini. Kako bi se osigurala zaštita od potencijalnih oštećenja od strane brodova, na oba kraja gdje kabel izlazi ili ulazi u more postavljaju se znakovi koji zabranjuju sidrenje. Ovi znakovi su izrađeni od armiranog betona i postavljeni su na uzdignutim mjestima bez vegetacije kako bi bili vidljivi i učinkoviti u sprječavanju potencijalnih oštećenja kabela [29].

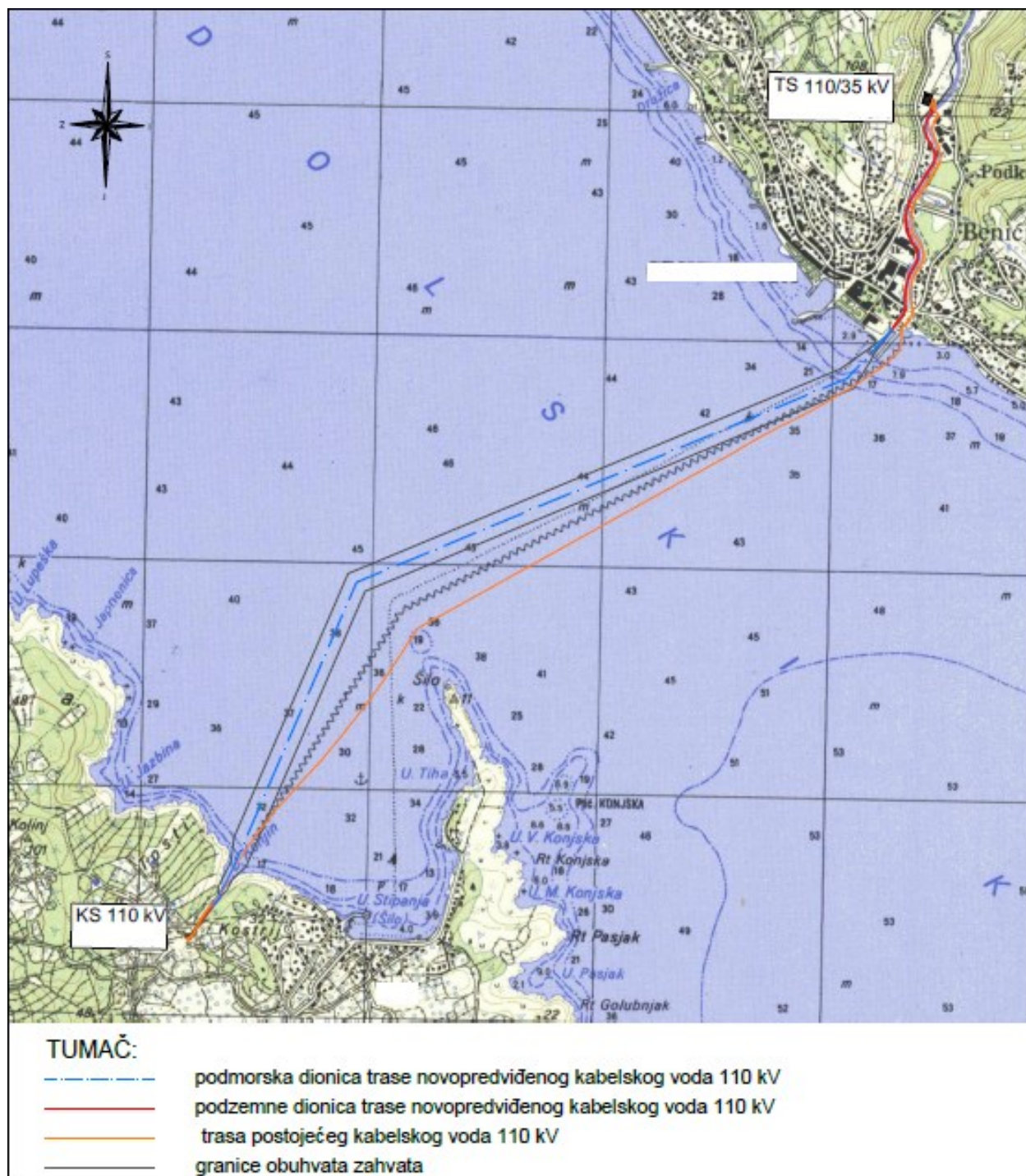
Podmorski kabel ima nazivni napon od 64/110 kV i sastoji se od trostrukih vodiča s presjekom  $3 \times 1 \times 800 \text{ mm}^2$  izrađenih od bakra. Vodiči su izolirani umreženim polietilenom (XPLE) [29].

Podzemni kabel koji se polaže na kopnenim dijelovima također ima isti nazivni napon od 64/110 kV. Sastoji se od trostrukih vodiča s većim presjekom, konkretno  $3 \times 1 \times 1000 \text{ mm}^2$ , koji su izrađeni od aluminija [29].

Podmorska kabelačka dionica sastoji se od tri jednožilna kabla snage 110 kV koji su paralelno postavljeni s međusobnim razmakom od 50 do 100 metara. Slično tome, kopnene dionice također se sastoje od tri jednožilna kabla snage 110 kV koji su postavljeni u obliku trokuta, dodirujući se. Ti kabeli se postupno razdvajaju kako se približavaju priobalnoj zoni, čime se postiže željena



udaljenost od 50-100 metara između njih. Osim energetskih kabela, u kabelskoj trasi predviđeno je i polaganje podmorskog svjetlosnog kabela [29].



Slika 5.1. Situacija trase novopredviđenog kabelskog voda [29]

## 5.1. Svrha projekta

Na temelju provedenih analiza zaključeno je da će tijekom razmatranog vremenskog perioda biti nužno zamijeniti podmorsku i podzemnu dionicu kabelske veze između kopna i otoka. Osim toga,

potrebno je povećati kapacitet prijenosa tog voda. Ako zadržimo postojeću kabelsku dionicu između kopna i otoka, koja trenutno ima ograničenu prijenosnu sposobnost od 70 MVA pri 110 kV, postoji rizik od preopterećenja veze kopno-otok tijekom visokih ljetnih opterećenja na drugim otocima koji su povezani s ovim vodom. Ovaj rizik dodatno raste s predviđenim porastom opterećenja izravnih potrošača na otoku. Takvo preopterećenje može rezultirati lančanim preopterećenjem veze između otoka, što bi potencijalno moglo dovesti do prekida napajanja drugih otoka u kritičnim situacijama [29].

Trenutni kabel je u funkciji od 1972. godine i koristi tehnologiju izolacije koja se temelji na uljem impregniranom papirom. Ova tehnologija nosi značajan ekološki nedostatak u usporedbi s novim predloženim kabelom, čija se izolacija temelji na umreženom polietilenu, plastičnom materijalu [29].

Trenutno, tijekom ljetnih udarnih opterećenja, vršno opterećenje ovog kabelskog voda premašuje njegovu nazivnu prijenosnu sposobnost. Na primjer, u srpnju 2015. godine ukupna vršna aktivna snaga iznosila je 66 MW, dok je ukupna prividna snaga bila oko 71 MVA [29].

Dodatni razlog za zamjenu podmorske dionice ovog voda je njegoza starost i tehnička dotrajalost [29].

## **5.2. Dionica trase s trožilnim 110 kV podmorskim kabelom**

Početna točka podmorske dionice je na kraju spojnice kopnenog kabela, odakle kabel vodi prema točki ulaska u zaštitnu cijev od PEHD promjera 500 mm. U području priobalne zaštite, kabeli se provode kroz PEHD cijev promjera 450 mm i spuštaju na dubinu od 10 metara ispod razine mora [29].

Trasa je pažljivo odabrana kako bi se izbjeglo vođenje kabela duž nagiba morskog dna i kako bi se izbjegao postojeći 110 kV kabel. Nakon izlaska iz priobalne zaštite na kopnu, podmorski kabel će prijeći preko postojeće PEHD cijevi promjera 500 mm, koja se koristi za podmorsko ispuštanje, na dubini od 25 metara. Za ovaj prijelaz, planirano je postavljanje "rampi" s obje strane, izrađenih od vreća napunjenih suhim betonom, kako bi se spriječilo slobodno viseće raspon preko cijevi ispuštanja [29].

Maksimalna dubina mora duž predviđene trase podmorskog 110 kV kabela iznosi 46 metara [29].

Na prilazu obali otoka, kabel će ponovno biti postavljen u cijevi bušene priobalne zaštite na dubini od 10 metara ispod razine mora. Ukupna duljina trase novopoloženog kablenskog voda između prijelaznih kablenskih spojnica iznosi 4210 metara [29].

Duž cijele trase, kabeli će biti postavljeni po pješčanom dnu, s iznimkom kratkog segmenta ispred ulaska u cijev priobalne zaštite na otoku. Kamenito dno očekuje se samo uz obalu otoka do dubine od 20 metara [29].

#### 5.2.1. Izvođenje kabela u bušenoj priobalnoj zaštiti

U dijelu trase gdje kabel prolazi s kopnenog dijela do dubine mora od 10 metara, planira se koristiti PEHD cijevi promjera 500 mm koje će biti postavljene primjenom tehnike navođenog bušenja (HDD - Horizontal directional drilling). Ova tehnika omogućava precizno postavljanje cijevi pod određenim kutom, čime se štiti kabel na kopnu i u uvali na otoku [29].

Proces provlačenja podmorskog kabela kroz cijevi priobalne zaštite sastoji se od nekoliko koraka. Prije početka, cijevi se pregledavaju radi prohodnosti, čiste se i pripremaju za povezivanje. Zatim se koristi vitlo na kopnenoj strani kako bi se povuklo užice koje je povezano s kablom na brodu za polaganje. Kabel na brodu je postavljen za izvlačenje na horizontalnim okretnim stolovima [29].

Početni dio kabela se izvlači s broda uz pomoć zračnih jastuka kako bi se postigla željena duljina, uzimajući u obzir mogućnosti pozicioniranja broda i traženu trasu. Izvučeni kabel se potom postavlja na odgovarajuće mjesto pomoću manjeg plovila te se potapa i provlači kroz cijev priobalne zaštite [29].

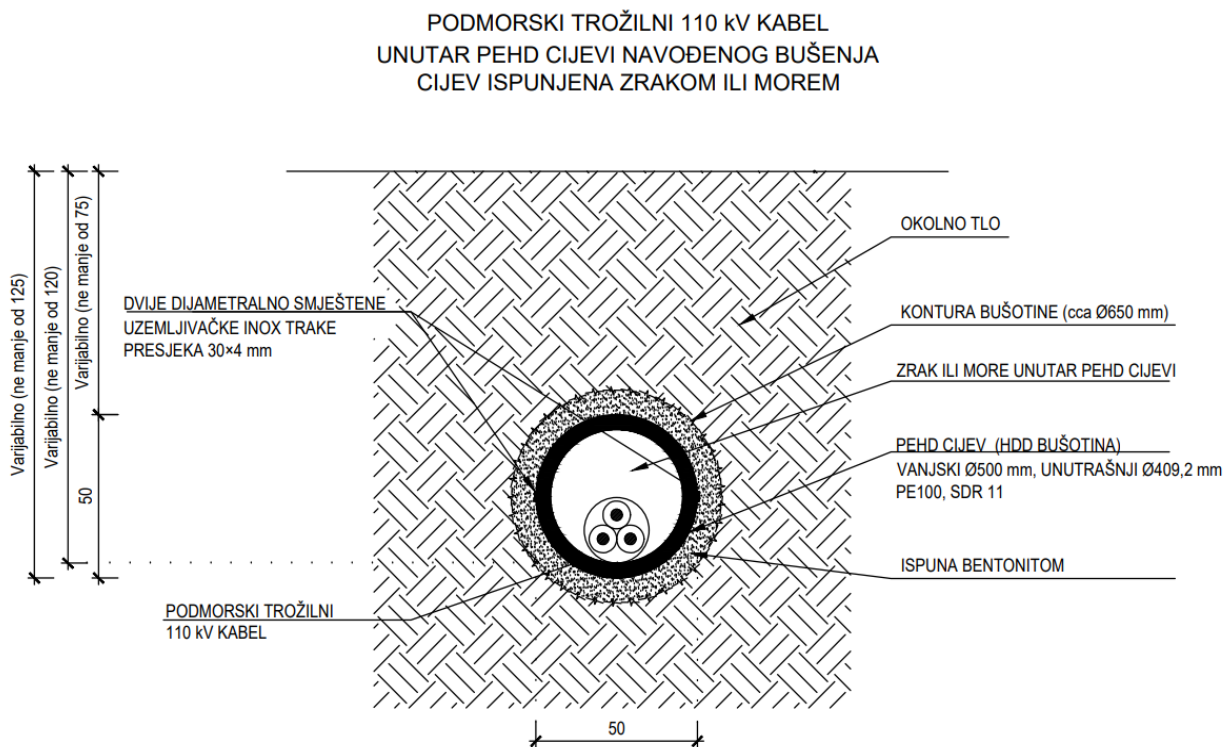
Na kopnenoj strani, ovisno o tehnikama izvođača i terenskim uvjetima, može se koristiti gusjeničar za manipulaciju s trožilnim kablom [29].

Pri provlačenju kabela do krajnje točke, sličan postupak se ponavlja, s razlikom da je ovdje potrebno odrezati kabel na brodu na potrebnu duljinu. Zatim se kabel spušta u more, pozicionira uz pomoć zračnih jastuka i provlači kroz cijev priobalne zaštite [29].

Nakon što se kabel provuče kroz cijevi priobalnih zaštita, ključno je izvršiti brtvljenje kako bi se spriječilo unošenje materijala iz kopnenih iskopa ili nanosa sedimenta s morske strane. Planira se

koristiti brtve s gumom i tijelima od nehrđajućeg čelika, poput brtve "Roxtec" (model H1-407/218/60/F3 S1559708C) [29].

Kod montaže brtve na morskoj strani, bitno je obratiti pažnju na plimu i oseku. Preporučuje se montirati brtvu tijekom oseke kako bi se smanjila količina vode unutar cijevi [29].



Slika 5.2. *Nacrt bušene priobalne zaštite* [29]

Napomena za sliku 5.2.: Uz PEHD cijev vanjskog promjera 500 mm, potrebno je vanjsku stranu cijevi opremiti s dvije INOX trake dimenzija 30x4 mm za uzemljenje. Ove trake trebaju biti izrađene od materijala koji udovoljava normi EN 1.4462 (duplex stainless steel) [29].

INOX trake trebaju biti smještene dijametralno suprotno oko PEHD cijevi. Na kopnenom kraju cijevi, INOX trake trebaju biti izvučene 2 metra u rov i zatrpane probranom zemljom iz iskopa. INOX trake mogu biti postavljene iznad ili ispod PEHD cijevi, ali je bitno da se što više očuva njihova dijametralnost u odnosu na PEHD cijev [29].

Kvalitetno postavljanje INOX traka je od suštinskog značaja kako bi ostale u jednom komadu, bez prekida uzduž bušotine. Također, treba osigurati izvod u tlo ispred bušotine. Ovo je neophodno kako bi se osiguralo dobro uzemljenje kabelskih stanica na koje će se ove trake povezati preko uzemljivača u kabelskom rovu [29].

### 5.2.2. Izvođenje kabela u ostatku podmorske trase

Na dubinama većim od 10 metara, kabel će se slobodno polagati na dno mora. U priobalnom dijelu trase, posebno u uvali na otoku, od točke gdje kabel izlazi iz priobalne zaštite na dubini od 10 metara pa do dubine od otprilike 20 metara, kabel će biti postavljen na stjenovitom dnu. Ovdje će biti potrebno posebno paziti na oštre stijene. Važno je napomenuti da se ovakva situacija ne očekuje nigdje drugdje duž podmorske dionice trase [29].

Posebna pozornost će se posvetiti mjestu predviđenog križanja 110 kV kabela s postojećom PEHD cijevi promjera 500 mm za podmorsko ispuštanje odvodnje na strani kopna. Za to mjesto planira se postaviti pripremljena "rampa" izrađena od vreća napunjenih suhim betonom kako bi se omogućio glatki prijelaz kabela preko cijevi ispusta [29].

Transport kabela od tvornice do lokacije polaganja, kao i samo polaganje kabela, bit će povjereni specijaliziranoj tvrtki za polaganje podmorskih kabela. Ova tvrtka će koristiti posebno opremljen brod polagač za izvođenje ovih zadataka [29].

S obzirom na specifičnosti ovakvih radova, kao i radi izbjegavanja mogućih pogrešaka i nezgoda, važno je uzeti u obzir sljedeće:

Prije svega, treba imati na umu da će se radovi odvijati na moru, što znači da će vremenski uvjeti biti nepredvidljivi. Izbor odgovarajućeg godišnjeg doba za rad na moru i praćenje preciznih vremenskih prognoza su izuzetno važni faktori za uspješno izvođenje posla. Eventualno produženje radnog vremena zbog neočekivanih vremenskih promjena trebalo bi biti standardna praksa. Unatoč potencijalnim troškovima povezanim s tim, kod ovakvih radova treba izbjegavati žurbu [29].

Priprema radne operacije treba biti detaljno razrađena kako bi se osiguralo učinkovito izvođenje posla. Ta priprema obuhvaća sljedeće korake i detalje:

- Izbor broda polagača (brod, maona i slično);
- Izbor broja i veličine pratećeg brodovlja (remorkeri, gliseri, čamci i sl.);
- Osigurati i na kritičnim mjestima duplirati bežične veze;
- Obavezno osigurati vitla za izvlačenje krajeva kabela;
- Osigurati jastuke („kušine“) za površinsko održavanje krajeva kabela;
- Ronilačka ekipa treba imati iskustva na sličnim poslovima;
- Sustav površinske navigacije treba biti visoke klase točnosti.

Meteorološki uvjeti su ključni faktor za uspješno izvođenje radova na podmorskom kabelu. Bez obzira na dužinu podmorske dionice, potrebno je:

- Pratiti tjednu i dnevnu prognozu vremena prije početka polaganja;
- U dogovoru s meteorologom odrediti dan početka polaganja;
- Za početnu točku polaganja odabire se strana na kojoj su oceanografski i meteorološki uvjeti lošiji.

Prije postavljanja kabela, provodi se temeljita inspekcija kabela trase. Ova inspekcija uključuje detaljno pregledavanje i označavanje plutačama na ključnim točkama, kao što su lomna mjesta duž podvodne rute i krajnje točke priobalnih zaštita u moru [29]. Ova označavanja pomažu u preciznom pozicioniranju i praćenju kabela tijekom postavljanja kako bi se osiguralo da se pravilno položi duž predviđene trase [29].

Posebna pažnja se posvećuje načinu sidrenja broda koji će se koristiti za polaganje kabela. Ova procedura ovisi o tipu broda polagača. Izvlačenje krajnjih točaka kabela predstavlja vrlo osjetljivu operaciju. U slučaju da nije moguće brod polagač privezati uz obalu, može se koristiti "betonska sidra", poznata kao "corpo-morto". Preporučuje se obavezno sidrenje na oba kraja kabela, tj. na obje obale. Ovo osigurava dodatnu stabilnost i sigurnost tijekom operacija postavljanja kabela [29].

Voditelj radova ima zadatak stvoriti detaljan plan postavljanja koji obuhvaća: vremenski raspored aktivnosti, alokaciju osoblja, raspored brodova, strategiju sidrenja broda na početnoj točki, metodologiju izvlačenja krajeva kabela prema obali te ostale relevantne elemente. S tim planom treba biti upoznati:

- Voditelja flote;
- Voditelja geodetske ekipe;
- Voditelja ronilačke ekipe;
- Voditelja radnih skupina na brodu i na kopnu;
- Nadzornog inženjera;
- Osiguravatelja radova i opreme.

Osobito je važno da svi sudionici na polaganju kabela budu na zbornom mjestu dan, a najkasnije večer prije polaganja kabela [29].

Na brodu se nalazi kabel koji će se postupno spuštati u more putem čelične konstrukcije, uz pomoć vodilica i kočnica. Na početku procesa polaganja, brod će biti sidren na odgovarajućoj dubini kako

bi se izbjeglo prekoračenje dozvoljenog gaza. Kabel će biti smješten na zračne jastuke, a za njegovo provlačenje kroz podvodni dio operacije koristit će se manji čamci opremljeni motorima. Također će sudjelovati ronionci koji će koristiti vitla postavljena na kopnu kako bi osigurali glatko spajanje kabela s podzemnim kabelom. Ova podvodna PEHD cijev ima promjer od 500 mm (unutarnji promjer 409,2 mm) i predstavlja ključni dio operacije spajanja kabela s podvodnim sustavom [29].

Tijekom cijelog postupka polaganja, lagani ronionci imaju ključnu ulogu u provođenju pregleda trase. Njihova odgovornost uključuje pažljivo spuštanje kabela s zračnih jastuka kako bi se osigurala sigurnost operacije. Dodatno, ronionci će kontinuirano pratiti proces polaganja kabela duž obale i biti odgovorni za otkrivanje eventualnih prepreka ili nepravilnosti u postavljanju kabela na dno. Ovo je važan dio osiguranja uspješnog i sigurnog polaganja kabela [29].

Tijekom postupka polaganja, brod se kreće brzinom od 1 do 2 km/h dok kabel prolazi s broda kroz uređaj za kontroliranje napetosti, vitlo i vodilicu te se spušta u more. Kontinuirano se prikupljaju podaci o različitim parametrima, uključujući duljinu položenog kabela, brzinu polaganja, napetost kabela i dubinu mora [29].

Napetost kabela se pravilno kontrolira ovisno o dubini polaganja, a brzina broda prilagođava se prema napetosti kabela kako bi se osiguralo da ne premašuje preporučenu granicu propisanu od strane proizvođača kabela. Ovo je ključno za osiguranje integriteta kabela tijekom postupka polaganja i sprječavanje potencijalnih oštećenja ili prenaprezanja kabela [29].

Tijekom postupka polaganja, za navigaciju broda koristi se radio-navigacijski sustav. Ovaj sustav koristi računalne alate za mjerenje udaljenosti između poznatih točaka i kontinuirano bilježi položaj broda, što omogućuje usporedbu stvarnog puta s planiranom trasom. Današnji svjetski standardi omogućuju visoku točnost površinske navigacije putem različitih sustava [29].

Iako se ovaj sustav primjenjuje duž većeg dijela trase, preporučuje se vizualna navigacija blizu obale i lomnih točaka uz pomoć plutača i vizira na obali. To dodatno osigurava preciznost i sigurnost postupka, posebno kada se brod približava obalnom području i drugim kritičnim točkama na trasi [29].

Kada se brod približi drugoj obali, bit će postavljen paralelno uz obalu. Dio kabela bit će smješten na zračne jastuke, a zatim će se, slično kao i ranije, uz pomoć čamaca i ronionca, izvući do mjesta

spajanja s podzemnim kabelom. Ovaj postupak osigurava siguran i precizan prijelaz kabela s broda na kopno i dalje prema podzemnom kabelu na obali [29].

Nakon što se kabel položi, provest će se ronjenje duž obalnih dijelova trase kako bi se snimio cijeli podvodni put pomoću podvodne kamere. Posebna pažnja bit će posvećena dijelovima trase s kamenitim dnom na kojima se kabeli polažu. U slučaju nepravilnosti ili prepreka, kabeli će se prilagoditi ili podići kako bi se izbjegla moguća oštećenja. Ovaj nadzor i prilagodba osiguravaju da kabeli budu postavljeni na siguran način i da ne budu izloženi potencijalnim rizicima nakon što su položeni [29].



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu temeljito smo istražili i analizirali podmorske kabele, istražujući različite aspekte njihove primjene i tehnologije. Razumijevanje podmorskih kabela i njihovih karakteristika postaje sve važnije u današnjem svijetu koji sve više ovisi o brzom i pouzdanom prijenosu električne energije i podataka.

Kroz ovaj rad, razmotrili smo različite vrste podmorskih kabela, namijenjene za prijenos električne energije. Uspoređivali smo prednosti i nedostatke HVAC (izmjenična struja) i HVDC (izmjenična struja) tehnologija za prijenos električne energije putem podmorskih kabela, istražujući njihove različite primjene u različitim uvjetima i udaljenostima.

Detaljno smo razmotrili proces proizvodnje podmorskih kabela, analizirajući kako se različiti dijelovi kabela izrađuju i povezuju kako bi se osigurala njihova čvrstoća, izolacija i zaštita od vanjskih utjecaja. Proučavali smo i važnost odabira spojnog pribora koji omogućava sigurno i pouzdano povezivanje kabela te osigurava nepropusnost u podmorskim uvjetima.

Projektiranje trase za polaganje podmorskih kabela pokazalo se kao ključan korak kako bi se osiguralo efikasno, sigurno i ekološki prihvatljivo polaganje. Analizirali smo različite čimbenike koji utječu na izbor trase, uključujući morsko dno, dubinu, udaljenost i obalne uvjete.

Dalje smo istražili različite metode polaganja podmorskih kabela, uključujući spuštanje s broda, polaganje na dno pomoću zračnih jastuka te povlačenje kabela kroz cijevi i spojeve. Svaka metoda ima svoje prednosti i izazove, a odabir odgovarajuće metode ovisi o specifičnim uvjetima projekta.

Na kraju, naglasak smo stavili na proces ispitivanja podmorskih kabela kako bismo osigurali njihovu funkcionalnost i pouzdanost. Ispitivanje uključuje električna, mehanička i hidrostatička ispitivanja kako bi se provjerila izdržljivost i performanse kabela u stvarnim uvjetima.

U cjelini, ovaj diplomski rad pruža duboko razumijevanje podmorskih kabela, njihovih primjena, tehnologija i procesa koji su ključni za njihovu uspješnu implementaciju. S obzirom na rastuću važnost energetske i komunikacijske infrastrukture, kontinuirano istraživanje i napredak u području podmorskih kabela postaje od suštinskog značaja za globalnu povezanost i održivi razvoj.

## LITERATURA

- [1] Elka d.o.o.: „Energetski visokonaponski kablei“, s interneta, <https://elka.hr/category/proizvodi/energetski-visokonaponski-kablei/>, 20 srpanj. 2023.
- [2] „Gradnja Kablovodov z Enožilnimi Energetskimi Kabli 64/110/123 kV“, Tehnična smernica za material in gradnjo, GIZ DEE, Slovenija, 2016
- [3] Pamić Z.: „Usporedba Bakra i Aluminija kao Materijala za Vodiče“, 5. savjetovanje HO-CIRED, Osijek, 2016.
- [4] „Technical Specifications for EHV 110 kV Power Cables“, s interneta, <https://www.pfcclindia.com/download/annex-3-110kv-ug-cable-specification.pdf>, 20. srpnja 2023.
- [5] Enel d.o.o.: „Global Infrastructure and Networks GSCH010 HV Underground Cable“, Italija, 2021.
- [6] EIRGRID Group d.d.: „110 kv, 220 kv, 400 kv Underground Cable Functional Specification“, Dokument CDS-GFS-00-001-R1, Irska, 2021.
- [7] Ardelean, M., Minnebo, P.; 2015; HVDC Submarine Power Cables in the World; EUR 27527 EN; doi: 10.2790/95735
- [8] ABB d.d.: „XLPE submarine cable systems – brochure“, 2015.
- [9] NKT A/S: „Three-core submarine cable with lead sheath“, s interneta, [https://nkt.widen.net/content/v65kevo021/pdf/A\\_2X\\_F\\_K2YRAA\\_420\\_kV\\_DS\\_EN\\_DEHV\\_HV\\_DS\\_DE-EN.pdf?u=gj0n1y](https://nkt.widen.net/content/v65kevo021/pdf/A_2X_F_K2YRAA_420_kV_DS_EN_DEHV_HV_DS_DE-EN.pdf?u=gj0n1y), 10. kolovoz 2023.
- [10] NKT A/S: „Three-core submarine cable with aluminium-polyethylene-laminated (APL) sheath“, s interneta, [https://nkt.widen.net/content/s3wv4n5n1q/pdf/\\_A\\_2X\\_FL\\_2YRAA\\_up\\_to\\_72.5\\_kV\\_DS\\_DE\\_ENHV\\_HV\\_DS\\_DE-EN.pdf?u=gj0n1y](https://nkt.widen.net/content/s3wv4n5n1q/pdf/_A_2X_FL_2YRAA_up_to_72.5_kV_DS_DE_ENHV_HV_DS_DE-EN.pdf?u=gj0n1y), 10. kolovoz 2023.

- [11] NKT A/S: „Three-core submarine cable with aluminium-polyethylene-laminated (APL) sheath“, s interneta, [https://nkt.widen.net/content/bg4wph5e5v/pdf/\\_A\\_2XS\\_FL\\_2YRAA\\_up\\_to\\_72.5\\_kV\\_DS\\_DE\\_EN.pdf?u=gj0n1y](https://nkt.widen.net/content/bg4wph5e5v/pdf/_A_2XS_FL_2YRAA_up_to_72.5_kV_DS_DE_EN.pdf?u=gj0n1y), 10. kolovoz 2023.
- [12] Mazzanti, G.: „Extruded Cable Systems for HVDC Transmission“, Glasgow, 2016.
- [13] Worzyk, T.: „Submarine Power Cables Design, Installation, Repair, Environmental Aspects“, ABB AB High Voltage Cables, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [14] Ray Bartnikas, K. D. Srivastava, „Power and Communication Cables: Theory and Applications“ IEEE Press Series on Power Engineering, ISBN 0-7803-1196-5, 2000.
- [15] Goodwin F. E. et al. „Recent Technological Developments for Lead Sheathed Cables. Transmission and Distribution Conference“, 1994. Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society, 10–15 April 1994, pp. 568ff, Chicago, USA.
- [16] Wilkinson H. D.: „Submarine Cable Laying and Repairing, The Electrician Printing and Publishing Company“, London, 1898.
- [17] Gilbertson O.: „Electric Cables for Power and Signal Transmission“, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [18] „HVDC Development options – Cable Capacity. 3rd Supporting Document to the Investment Proposal for the HVDC Inter-Island Link Upgrade Project“, Transpower New Zealand Ltd, 2005. <http://www.electricitycommission.govt.nz/pdfs/opdev/transmis/gup/Vol3/HVDC-Supporting-docs/3-Cable-capacity.pdf>, 15. kolovoz 2023.
- [19] . Foxall R. G. et al: „Design, Manufacture and Installation of a 525 kV Alternating Current Submarine Cable“, Link from Mainland Canada to Vancouver Island. Paper 21-04, Cigré Session 1984, Paris, France
- [20] „Vesselfinder“, s interneta, <https://www.vesselfinder.com/vessels/details/9413535>, 20. kolovoz 2023.

- [21] „Asso.subsea“, s interneta, <https://www.assogroup.com/fleet/cable-laying-vessels/ariadne/>, 20. kolovoz 2023.
- [22] „Irt3000“, s interneta, [https://www.irt3000.com/hr/vijesti/2022022517414410/pocelo\\_polaganje\\_podmorskog\\_kabela\\_izme%C4%91u\\_postira\\_na\\_bracu\\_i\\_dugog\\_rata/](https://www.irt3000.com/hr/vijesti/2022022517414410/pocelo_polaganje_podmorskog_kabela_izme%C4%91u_postira_na_bracu_i_dugog_rata/), 20. kolovoz 2023.
- [23] „Crushtymks“, s interneta, <https://crushtymks.com/hr/energy-and-power/633-installing-a-submarine-transmission-cable-how-they-do-it.html>, 20. kolovoza 2023.
- [24] „HVDC Development options - Cable Capacity. 3rd Supporting Document to the Investment Proposal for the HVDC Inter-Island Link Upgrade Project, Transpower New Zealand Ltd, 2005.“, s interneta, <http://www.electricitycommission.govt.nz/pdfs/opdev/transmis/gup/Vol3/HVDCSupporting-docs/3-Cable-capacity.pdf>, 10. kolovoz 2023.
- [25] Alfanar Company; „High Voltage Power Cables“, Technical Catalogue, S interneta, [https://www.alfanar.com/catalogs/cables\\_wires/HV\\_cables.pdf](https://www.alfanar.com/catalogs/cables_wires/HV_cables.pdf), 25. kolovoz 2023.
- [26] „High Voltage Offshore AC Cables“, s interneta, <https://www.nkt.com/products-solutions/high-voltage-cable-solutions/high-voltage-offshore-solutions/high-voltage-offshore-ac-cables>, 25. kolovoz 2023.
- [27] M., Ožegović, K., Ožegović, „Električne energetske mreže I“, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, Split, 1996.
- [28] Elka d.o.o.; „Energetski visokonaponski kabeli“, s interneta, <https://elka.hr/category/proizvodi/energetski-visokonaponski-kabeli/>, 25. travanj 2023.
- [29] HOPS (Hrvatski operator prijenosnog sustava) d.d., s interneta, <https://www.hops.hr/>, veljača 2022.

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad detaljno istražuje podmorske kabele, njihove tipove, tehnologije polaganja i ispitivanja. Kroz analizu HVAC i HVDC tehnologija za prijenos energije, istražili smo njihove prednosti i nedostatke. Proces proizvodnje podmorskih kabela i odabir spojnog pribora proučavani su kao ključni koraci za osiguranje njihove čvrstoće i funkcionalnosti. Projektiranje trase za polaganje, uključujući metode polaganja i navigaciju, istaknuto je kao ključno za sigurno i efikasno postavljanje. Ispitivanje podmorskih kabela obuhvatilo je električka, mehanička i hidrostatička testiranja kako bi se osigurala njihova pouzdanost. Ovaj rad doprinosi dubljem razumijevanju tehnologije podmorskih kabela i važnosti njihove primjene za globalnu povezanost i održivi razvoj.

**Ključne riječi:** jednožilni i trožilni podmorski kabele, 110 kV, IEC, vodič, izolacija, HVAC, HVDC, proizvodnja, spojni pribor, projektiranje trase, tehnologija polaganja, ispitivanje kabela

## **SUMMARY**

This master's thesis thoroughly explores submarine cables, their types, laying technologies, and testing procedures. Through the analysis of HVAC and HVDC technologies for energy transmission, we have examined their advantages and disadvantages. The process of manufacturing submarine cables and the selection of connecting accessories have been studied as key steps to ensure their strength and functionality. Designing the route for laying, including laying methods and navigation, has been emphasized as crucial for safe and efficient installation. Testing of submarine cables has included electrical, mechanical, and hydrostatic testing to ensure their reliability. This study contributes to a deeper understanding of submarine cable technology and the importance of their application for global connectivity and sustainable development.

**Keywords:** single-core and three-core submarine cables, 110 kV, IEC, conductor, insulation, HVAC, HVDC, production, jointing accessories, route design, laying technology, cable testing

## PRILOZI

1. Tablica pet generičkih vrsta elektroenergetskih podmorskih kabela [13]

					
Vrsta kabela br.	1	2	3	4	5
Nazivni napon $U_0$	33 kV AC	150 kV AC	420 kV AC	150 kV DC	450 kV DC
Izolacija	XLPE, EPR	XLPE	Ulje/papir ili XLPE	Polimer	Maseno-impregnirana
Tipična primjena	Opskrba malih otoka, povezivanje offshore vjetroelektrana	Povezivanje otoka s velikim brojem stanovnika, kabeli za izvor energije iz offshore vjetroelektrana	Prelazak rijeka/uskih prolaza s velikim kapacitetom prijenosa	Velike udaljenosti povezivanja offshore platformi ili vjetroelektrana	Velike udaljenosti povezivanja autonomnih mreža za napajanje na velike udaljenosti
Maksimalna duljina	20 - 30 km	70 - 150 km	< 50 km	> 500 km	> 500 km
Prijenosna moć	30 MW	180 MW	700 MW/ tri kabela	1000 MW/ par kabela	600 MW/ kabel