

# Ispitivanja visokonaponskih kabela prije puštanja u pogon

---

**Kovačević, Steven**

**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:190:981476>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-01**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ISPITIVANJA VISOKONAPONSKIH KABELA PRIJE**

**PUŠTANJA U POGON**

Rijeka, srpanj 2023.

Steven Kovačević

0069040539

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ISPITIVANJA VISOKONAPONSKIH KABELA PRIJE**

**PUŠTANJA U POGON**

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

Rijeka, srpanj 2023.

Steven Kovačević

0069040539

Rijeka, 19. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Prijenos i distribucija električne energije**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Steven Kovačević (0069040539)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **ISPITIVANJA VISKONAPONSKIH KABELA PRIJE PUŠTANJA U POGON /  
TESTING OF HIGH VOLTAGE CABLES BEFORE COMMISSIONING**

### Opis zadatka:

Pregled konstrukcija VN kabela. Tehnički zahtjevi za preuzimanje kabela nakon proizvodnje. Norme, ispitna oprema i tehnički zahtjevi za ispitivanje VN kabela nakon polaganja i prije puštanja u pogon. Razrada postupaka ispitivanja VN kabela prije puštanja u pogon.

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

*S. Kovačević*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

*V. Komen*

Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:


*V. Sučić*

Prof. dr. sc. Viktor Sučić

## IZJAVA

Prema čl. 7. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku sveučilišnih diplomskih studija, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad naziva „Ispitivanja visokonaponskih kabela prije puštanja u pogon“.

Steven Kovačević

S. Kovačević 

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Vitomiru Komenu na podršci, vodstvu i mentorstvu tijekom izrade diplomskog rada i tijekom cijelog studija.

Zahvaljujem se na dostupnosti i podršci koja mi je pružena, na otvoren razgovor o svakoj temi i pitanju.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KONSTRUKCIJA VISOKONAPONSKIH KABELA.....	2
2.1. Konstrukcijski elementi kabela.....	2
2.2. Kabelski spojni pribor .....	5
2.3. Tipovi visokonaponskih kabela .....	9
2.3.1. Konstrukcija 2XS(F)2Y i A2XS(F)2Y.....	9
2.3.2. Konstrukcija 2XS(FL)2Y i A2XS(FL)2Y.....	11
2.4. Strujno opterećenje visokonaponskih kabela.....	14
3. POGON VISOKONAPONSKIH KABELA .....	17
4. NORME ZA PROVEDBU ISPITIVANJA VISOKONAPONSKIH KABELA .....	19
4.1. Norme .....	19
4.2. Ispitna oprema.....	24
4.3. Metode i vrste ispitivanja .....	25
4.3.1. Ispitivanje istosmjernim naponom.....	25
4.3.2. Ispitivanje izmjeničnim naponom vrlo niske frekvencije.....	26
4.3.3. Ispitivanje izmjeničnim naponom.....	27
4.3.4. Ispitivanje parcijalnih izbijanja.....	27
5. ISPITIVANJA VISOKONAPONSKIH KABELA.....	29
5.1. Ispitivanja VN kabela prema vrsti ispitnog sustava.....	32
5.1.1. Ispitivanje izmjeničnim naponom prema načinu kompenzacije jalove snage kabela.....	34
5.1.2. Ispitivanje kabela impulsnim naponom.....	36
5.1.3. Ispitivanje izmjeničnim naponom niske frekvencije (VLF sustavi).....	37
6. ISPITIVANJE VISOKONAPONSKIH KABELA PRIJE PUŠTANJA U POGON ..	40
6.1. Postupak ispitivanja identifikacije faza.....	43

6.2. Ispitivanje otpora vodiča .....	45
6.3. Ispitivanje kapaciteta kabela.....	46
6.4. Ispitivanje vanjskog plašta kabela.....	47
6.5. Ispitivanje otpora izolacije.....	50
6.6. Postupak provjere poprečnog spajanja visokonaponskog kabela .....	55
6.7. Postupak ispitivanja impedancije nultog sustava i impedancija direktnog i inverznog sustava .....	56
7. ZAKLJUČAK .....	58
LITERATURA.....	60
SAŽETAK .....	61
ABSTRACT.....	62



## 1. UVOD

Predmet ovoga rada je ispitivanje visokonaponskih kabela prije puštanja u pogon. Vodiči koji se nalaze unutar kabela su najčešće izrađeni od bakrenih ili aluminijskih žica, odnosno užadi. Kabeli predstavljaju vrlo važne dijelove u elektroenergetskom sustavu te se koriste u svrhu raznih namjena koje teže zajedničkom cilju koji se temelji na pouzdanom i sigurnom prijenosu električne energije na određenoj udaljenosti. Održavanje 110 kV kabelskih vodova se do sada uglavnom svodilo na vizualni pregled, što zbog same prirode trasa nije moguće u većem opsegu, jer su kabeli uglavnom položeni u otvorenom kabelskom tunelu i zakopani ili položeni u kanalizacijske cijevi. Uz konvencionalne metode ispitivanja i dijagnostike kabelskog sustava, moguće je korištenje novih tehnologija koje pružaju mogućnost praćenja uzdužnog temperaturnog profila i mjerenje parcijalna pražnjenja pomoću senzora. Osnovnu strukturu kabela čini bakreni ili aluminijski višezilni, odnosno segmentni vodič (većih presjeka  $<1200 \text{ mm}^2$ ). Na vodiču se ekstrudira zaštitni poluvodljivi sloj, zatim izolacija i preko nje ekstrudira poluvodljivi sloj. Sve se izvodi u procesu trostruke ekstruzije. Do ove točke, konstrukcija se ne mijenja i ključna je kada se radi o ispitivanju.

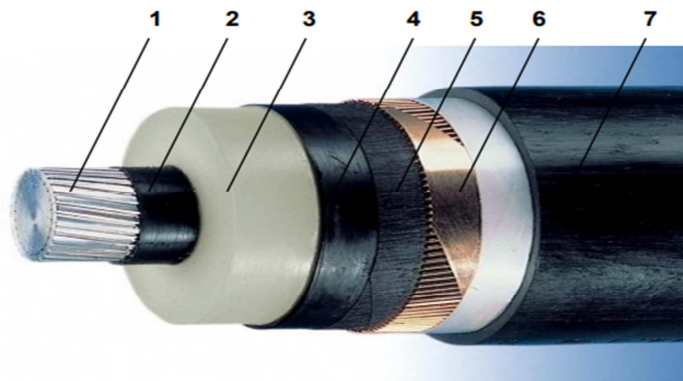
Cilj ovoga rada je opisati konstrukciju visokonaponskih kabela, zatim prikazati i opisati norme, ispitnu opremu i tehničke zahtjeve koje je potrebno poštivati kako bi se realizirala provedba ispitivanja visokonaponskih kabela. Isto tako, cilj ovoga rada je prikazati postupke ispitivanja visokonaponskih kabela prije puštanja u pogon.

## 2. KONSTRUKCIJA VISOKONAPONSKIH KABELA

### 2.1. Konstrukcijski elementi kabela

Temeljna konstrukcijska shema za energetske kabele koji se koriste za visoke napone i vrlo visoke napone nije standardizirana, zbog čega se kabelski pribor mora prilagoditi svakom dizajnu kabela pojedinačno. Shodno tome, dizajn i sustav kabelskog pribora mora biti prilično fleksibilan. Kabel se od konstrukcijskih elemenata poput (slika 2.1) [1,2]:

- vodiča,
- poluvodljivog zaslona vodiča,
- žila,
- izolacijskog materijala,
- električne ili mehaničke zaštite,
- metalnog plašta,
- vanjskog plašta.



*Slika 2.1: Sastavni dijelovi kabela [3]*

Legenda slike:

1. vodič,
2. zaslon vodiča,
3. izolacija,
4. zaslon iznad izolacije,
5. vodobubriva traka za uzdužno brtvljenje,
6. električni oklop,
7. vanjski plašt s aluminijskom folijom za poprečno brtvljenje.

Vodiči se izrađuju na temelju zahtjeva standarda IEC 60228, prilikom čega se koriste okrugli kompaktirani vodiči klase 2, od bakra ili aluminijski, dok se segmentni vodiči koriste prilikom većih presjeka. Vodiči se mogu konstruirati na temelju nepropusne izvedbe koju je moguće ostvariti putem ugradnje materijala koji nabubri prilikom dodira s vodom, i samim time sprječavaju prodiranje vode uzdužno kroz vodič.

Zaslon vodiča i zaslon iznad izolacije predstavljaju poluvodljivi sloj koji se postavlja iznad vodiča i iznad izolacije. Zaslon vodiča i zaslon iznad izolacije se mogu poistovjetiti sa ekranom vodiča ili izolacije. Ovaj sloj pokušava izjednačiti električno polje, a prilikom izvedbe vodiča postoji mogućnost postojanja neravnina i šiljaka koji mogu razoriti izolaciju kabela to uzrokovati proboj. Ovaj sloj nije velike debljine, sastoji se od reda raspona 1 mm. Ukoliko dođe do bilo kakve nečistoće ili nehomogenosti, može doći do proboja, zbog čega slojevi moraju dobro prijanjati jedan uz drugoga.

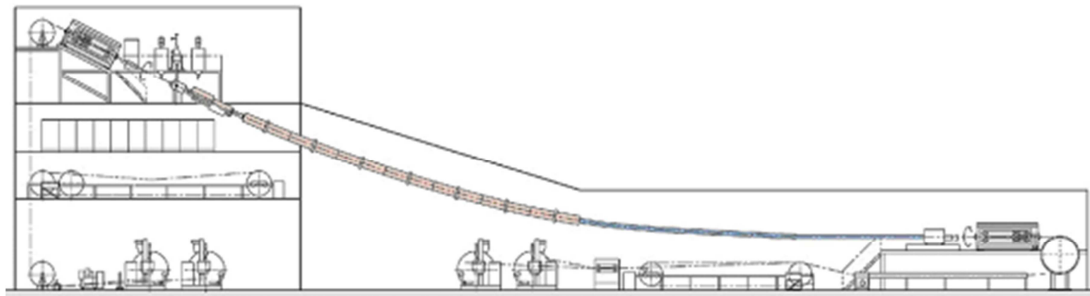
Žile kabela se izrađuju pomoću istovremenog ekstrudiranja tri sloja XLPE na vodiče tako da se u jednoj glavi stavlja poluvodljivi sloj na vodič, izolacija i poluvodljivi sloj na izolaciju, prilikom čega se slojevi lijepe s ciljem postizanja bolje čvrstoće. Prilikom izrade žila kabela, prostor između njih u niti jednom trenu nije izložen onečišćenju, jer se prilikom ovog postupka koriste materijali sa visokom čistoćom unutar vrlo čistog okruženja. Proizvodu visoke kvalitete prethode trostruka ekstruzija, suhi postupak umrežavanja i hlađenja.

Izolacijski materijal je nastao putem postupka polimerizacije iz polietena koji je rezultirao termoplastičnim polietenom tj., polietenom visoke gustoće (PE, HDPE) ili daljnjeg postupka kemijskog umreženja odnosno energetskog zračenja umreženog polietena koji je rezultirao materijalom sa dobrim izolacijskim svojstvima. Najviše problema prilikom ispitivanja se pojavilo na kabelskom priboru, no svi uzroci koji su doveli do proboja su fiksirani na jednom mjestu zbog krute izolacije. Postupak nanošenja izolacijskog materijala se provodi u vertikalnim i kosim ekstruderima koji pružaju mogućnost brizganja sva tri sloja u isto vrijeme. Prethodno navedeni postupak se naziva postupak trostruke ekstruzije koji obuhvaća zaslon vodiča, izolaciju i zaslon izolacije. Ovaj proizvodni proces mora osigurati najvišu razinu čistoće i kvalitete.

Električni oklop kabela predstavlja dio kabela koji rješava probleme polja kabela te je odgovoran za raspodjelu struje ukoliko dođe do kratkog spoja. Električna zaštita je napravljena putem standardne izvedbe, odnosno izvodi se putem bakrenih žica koje su helikoidalno omotane sa kontra spiralom trake od bakra. S ciljem postizanja uzdužne vodonepropusnosti, ispod i iznad žice se omotavaju trake od materijala koji u vodi nabubri ili nekih drugih materijala. Poprečnu vodonepropustljivost je moguće postići putem polaganja aluminijske trake, koja sadrži sloj kopolimera, na plašt. Kod ekrana je moguća ugradnja svjetlovodne niti s ciljem prijenosa podataka ili mjerenja temperature unutar kabela tokom rada.

Plašt se izrađuje putem ekstrudiranja PE, a na temelju zahtjeva je moguće koristiti i ostale materijale koji kabele pružaju mogućnost bezhalogenosti i vatrootpornosti. Debljinu plašta je moguće odrediti na temelju preporuke IEC 60502 ( $t=0,035xD+1$  mm, gdje se D promjer nalazi ispod plašta). No, ukoliko je riječ o težim uvjetima u kojima se koristi kabel, preporučljiva je veća debljina plašta. Plašt se može izvesti putem dodatno ekstrudiranog tankog sloja poluvodljivog materijala (engl. *skin*) koje pruža mogućnost ispitivanja plašta putem napona, unutar tvornice, nakon provedenog transporta, polaganja ili prilikom periodičkih ispitivanja.

Slika 2.2 prikazuje shematski prikaz linije za izoliranje visokonaponskog kabela.



Slika 2.2: Shematski prikaz linije za izoliranje visokonaponskog kabela [2]

Kabeli se unutar tehničke dokumentacije i prilikom naručivanja označavaju na temelju HRN HD, čije su oznake prikazane i objašnjene u nastavku [2]:

- A – aluminijski vodič,
- - - bakreni vodič bez simbola,
- 2X – XPLE izolacija,
- S – bakreni ekran,
- Y – plašt od PVC,
- 2Y – plašt od PE,
- (F)2Y – uzdužna vodonepropusnost sa PE plaštem,
- (FL)2Y – uzdužna i poprečna vodonepropusnost sa AI/PE plaštem.

U nastavku su prikazani primjeri označavanja kabela [2]:

- A2XS(F)2Y1x1000/95mm<sup>3</sup>64/100kV,
- 2XS(FL)2Y1x500/95mm<sup>3</sup>64/110kV.

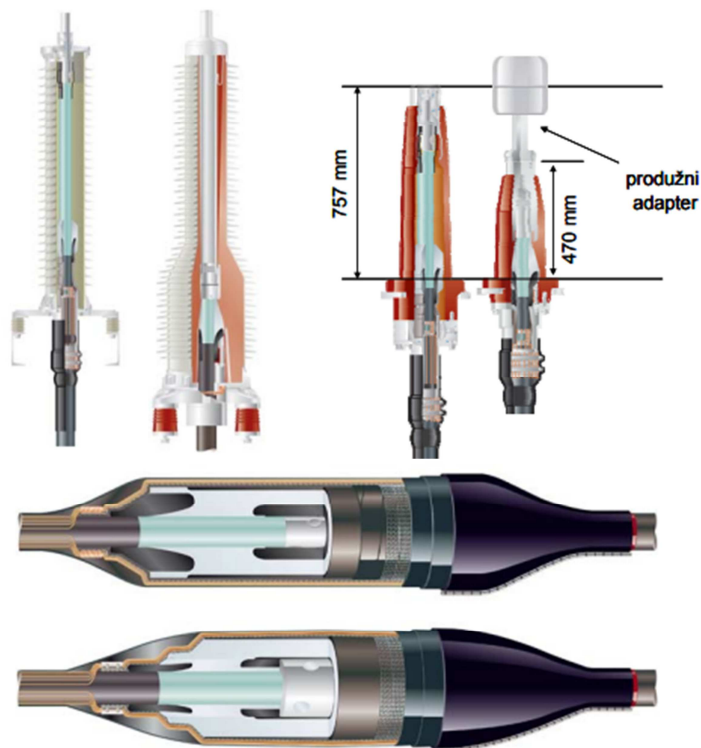
A2XS(F)2Y1x1000/95mm<sup>3</sup>64/100kV predstavlja jednožilni kabel koji se sastoji od aluminijskog vodiča čiji presjek iznosi 1000 mm<sup>2</sup>, izolacije od umreženog polietena sa poluvodljivim slojem koji se nalazi iznad i ispod izolacije, električne zaštite od bakra čiji presjek iznosi 95 mm<sup>2</sup>, uzdužne vodonepropusne izvedbe električne zaštite, PE plašta te nazivnog uspona  $U_0/U = 64/100$  kV, te najvišeg napona mreže  $U_m = 123$  kV.

2XS(FL)2Y1x500/95mm<sup>3</sup>64/110kV predstavlja jednožilni kabel koji se sastoji od bakrenog vodiča čiji presjek iznosi 500 mm<sup>2</sup>, izolacije od umreženog polietena sa poluvodljivim slojem koji se nalazi iznad i ispod izolacije, električne zaštite od bakra čiji presjek iznosi 95 mm<sup>2</sup>, uzdužne vodonepropusne izvedbe električne zaštite, PE plašta te nazivnog uspona  $U_0/U = 64/100$  kV te najvišeg napona mreže  $U_m = 123$  kV.

## 2.2. Kabelski spojni pribor

Kabelski pribor se može podijeliti u (slika 2.3) [1]:

- završetke za vanjsku ugradnju, odnosno brtvene krajeve,
- završetke za postrojenja/transformatore, odnosno aparatne završetke,
- spojnice.

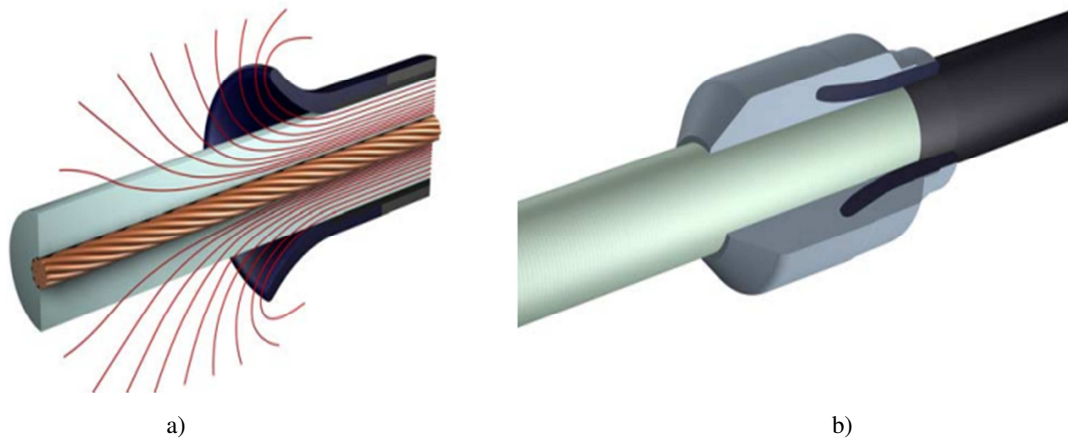


Slika 2.3: Kabelski pribor [1]

Završetci pružaju mogućnost priključne točke vodiča na samom kraju energetskeg kabela i njegovog spajanja sa drugim dijelom električnog sustava. Prethodno navedena priključna točka se nalazi u zraku, a može se nalaziti i unutar neke građevine ili na vanjskim mjestima koja su izložena izravnom zračenju od strane sunca, atmosfere i ostalim vanjskim utjecajima, zbog čega se završetci mogu podijeliti na unutarnje i vanjske završetke. Spojnica povezuje dva energetska kabela jednog s drugim s ciljem produživanja ukupne dužine kablenskog voda i osiguranja neprekinutosti strujnog kruga.

Svaki kabelski pribor se sastoji od glavne komponente koju čini element kontrole električnog polja. Primjerice, za naponske razine od 72 kV pa na dalje su sve raspoložive tehnike orijentirane na geometrijskoj metodi raspodjele električnog polja koje ujedno predstavlja u najstariju metodu. Putem posebno oblikovane upravljačke elektrode (deflektora) se postiže kontrolirana raspodjela električnog polja, upravljačka elektroda se postavlja na kraj zaslona izolacije preko kojega je galvanski spojena na potencijal zemlje. Rad upravljačke elektrode se temelji na izmjenjivanju nepovoljne i nehomogene raspodjele

električnog polja putem svog prisustva, na način da smanjuje maksimalnu jačinu električnog polja na vrijednost koja je tehnički dozvoljena te održava tangencijalnu komponentu električnog polja, koji se nalazi između izolacije kabela i izolacijskog tijela upravljačke elektrode, ispod vrijednosti koja je maksimalno dozvoljena i unaprijed utvrđena [1]. Slika 2.4a prikazuje princip geometrijskog postupka kontrole raspodjele električnog polja koji ima ugrađenu upravljačku elektrodu u obliku lijevka, dok slika 2.4b prikazuje izgled upravljačke elektrode koja je tvornički dogotovljena s ciljem kontrolirane raspodjele električnog polja u visokonaponskom kabelskom priboru.



*Slika 2.4: a) raspodjela ekvipotencijalnih linija na završetku zaslona izolacije s ugrađenom upravljačkom elektrodom u obliku lijevka/ b) izgled deflektora za kontrolu električnog polja u jednom kabelskom završetku (ugrađena elektroda u obliku lijevka) [1]*

Zadaća elementa za raspodjelu električnog polja u određenom priboru koji podrazumijeva završetak ili spojnici, je kontroliranje s ciljem onemogućavanja prelaska određenog izolacijskog limita materijala kod nazivnog pogonskog napona te ukoliko se pojave kratkotrajni impulsi prenaponi koji posjeduju znatno višu amplitudu od one koja se nalazi kod naponske nazivne vrijednosti. Shodno tome, slika 2.5 prikazuje razinu jačine električnog polja u izolaciji energetskih kabela koje je potrebno kontrolirati na kraju kabela sa odgovarajućim kabelskim priborom putem sljedećih formula:

$$E_1 = \frac{2U_0}{d_{ii} \cdot \ln(D_{io}/d_{ii})} \quad (2.1)$$

$$E_o = \frac{2U_0}{D_{io} \cdot \ln(D_{io}/d_{ii})} \quad (2.2)$$

U ovim formulama izrazi označavaju:

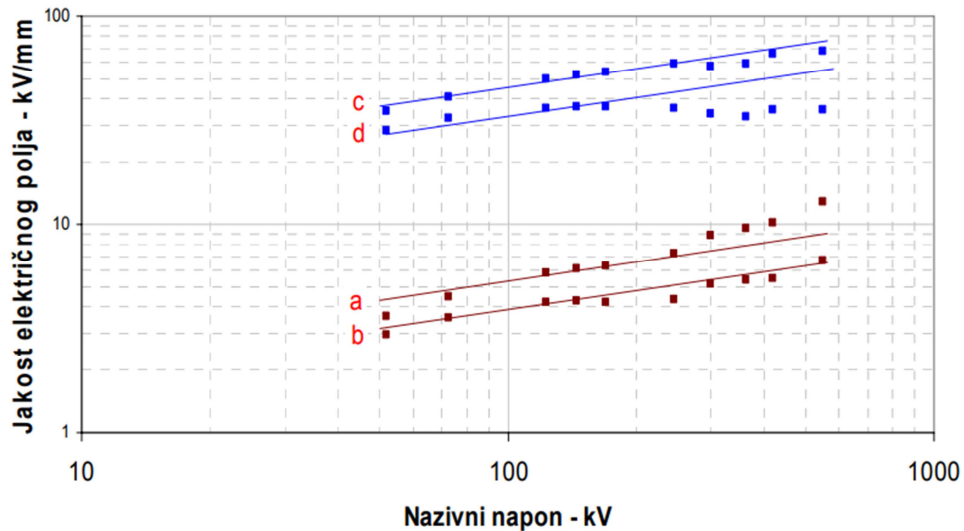
$$D_{io} = d_{ii} + 2t_n$$

$D_{ii}$  - deklarirani nazivni unutarnji promjer izolacije,

$D_{io}$  – računom određeni nazivni vanjski promjer izolacije,

$t_n$  – deklarirana nazivna debljina izolacije,

$U_o$  – nazivni fazni napon kojim se određuje vrijednost za ispitne napone.



Slika 2.5: Jakost električnog polja koji se nalazi unutar visokonaponskih energetske kabela [1]

Crvene točke predstavljaju razinu jačine električnog polja kod nazivnog izmjeničnog pogonskog napona na sljedećim primjerima:

- unutarnji promjer izolacije, iznad zaslona vodiča koje se računa putem formule 2.1,
- vanjski promjer izolacije, ispod zaslona izolacije koje se računa putem formule 2.2.

Plave točke također predstavljaju razinu jačine električnog polja kod nazivnog atmosferskog udarnog napona (1,2/50  $\mu$ s) na sljedećim primjerima:

- unutarnji vanjski promjer izolacije, iznad zaslona vodiča koje se računa putem formule 2.1,
- vanjski promjer izolacije, ispod zaslona izolacije, koje se računa putem formule 2.2.



Prilikom dizajniranja kablenskog pribora, najkritičnija vrijednost dizajniranja predstavlja električno polje koje se nalazi na vanjskoj površini izolacije kod atmosferskog udarnog napona oblika (1,2/50  $\mu$ s) kojeg prikazuje pravac d na slici 2.5. Prethodno navedena vrijednost električnog polja se očituje putem svojstava elemenata koji služe za kontrolu električnog polja. Prilikom proizvodnje energetskih kabela se pojavio aktualan trend koji ukazuje na to kako će se debljina izolacije nastaviti smanjivati, ovaj trend se najviše orijentira na energetske kabele koji se također nazivaju i električki prenategnutom izolacijom i na nazivne napone od 123 – 170 kV koji imaju visoku razinu električnog opterećenja kod kabela za napon od 500 kV. Prilikom dizajniranja kablenskog pribora je potrebno uzeti u obzir prethodno navedeni porast električnog opterećenja, a ukoliko se radi o već postojećem kablenskom priboru potrebno je provesti ponovno preispitivanje i potvrđivanje dizajna [1].

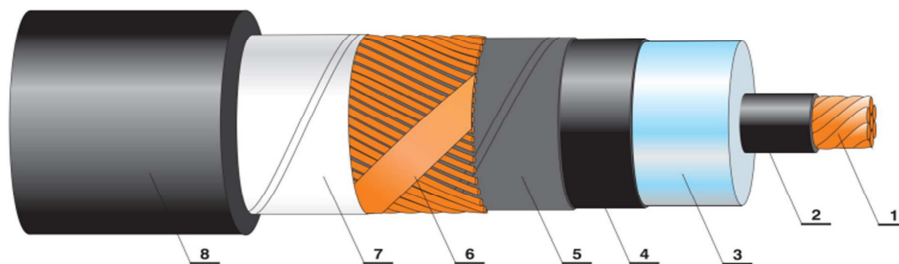
### 2.3. Tipovi visokonaponskih kabela

Tipovi kabela su prikazani u nastavku [2]:

- 2XS(F)2Y, A2XS(F)2Y,
- 2XS(FL)2Y, A2XS(FL)2Y.

#### 2.3.1. Konstrukcija 2XS(F)2Y i A2XS(F)2Y

Ovaj tip kabela predstavlja energetski kabel koji se sastoji od XLPE izolacije, PE plašta koji posjeduje uzdužnu vodonepropusnu izvedbu električne energije. Stara oznaka ovog tipa kabela glasi: XHE 49, XHE 49-A. Standardi koji se primjenjuju prilikom izrade ovoga kabela jesu IEC 60840 i HRN HD 632. Nazivni napon iznosi  $U_0/U = 64/100$  kV, a najviši napon mreže iznosi  $U_m = 123$  kV. Konstrukcija ovoga tipa kabela je prikazana na slici 2.6.



Slika 2.6: Konstrukcija 2XS(F)2Y i A2XS(F)2Y [4]

Legenda prikazana na slici 2.6 se sastoji od:

1. bakrenog ili aluminijskog vodiča koji je kompaktiran ili segmentiran uže klase 2,
2. ekrana vodiča kojeg karakterizira ekstrudirani poluvodljivi XLPE,
3. izolacije XLPE,
4. ekrana izolacije sa ekstrudiranim i poluvodljivim XPLE,
5. separatora sa bubrivom trakom sa poluvodljivim slojem,
6. metalnog ekrana u kojem se nalaze bakrene žice,
7. separatora sa bubrivom trakom i
8. kontraspirala od bakrene trake i plašta od crnog HDPE.

Tablica 2.1 prikazuje izmjere za 2XS(F)2Y, dok tablica 2.2 prikazuje izmjere za A2XS(F)2Y.

Tablica 2.1: Izmjere za 2XS(F)2Y [2]

Presjek vodiča i el. zaštite	Promjer vodiča	Debljina izolacije	Promjer preko izolacije	Promjer kabela	Težina kabela	Najmanji polumjer savijanja	Maksimalna sila povlačenja
$\text{nxmm}^2/\text{mm}^2$	Mm	Mm	Mm	mm	kg/km	m	kN
1x150/95	14,1	18	54,9	64,5	4910	0,97	7,5
1x185/95	15,7	17	54,5	64,1	5145	0,96	9,2
1x240/95	18,0	16	54,8	64,4	5614	0,97	12,0
1x300/95	20,3	15	55,1	64,7	6085	1,00	15,0
1x400/95	23,0	15	57,6	67,4	7075	1,01	20,0
1x500/95	26,5	15	61,3	71,3	8185	1,07	25,0
1x600/95	30,3	15	64,5	74,8	9740	1,20	31,5
1x800/95	36,9	15	71,8	82,6	11869	1,24	40,0

Tablica 2.2: Izmjere za A2XS(F)2Y [2]

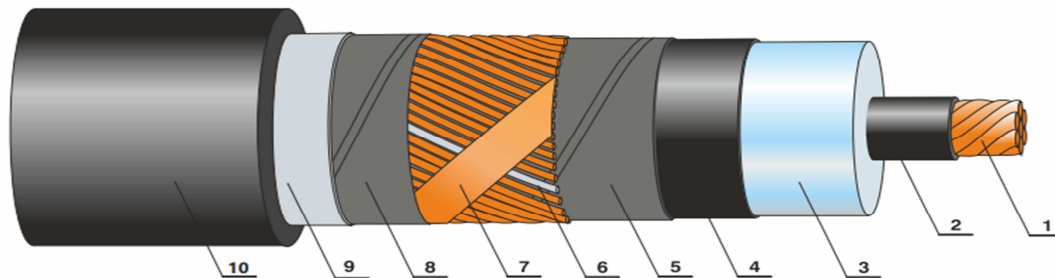
Presjek vodiča i el. zaštite	Promjer vodiča	Debljina izolacije	Promjer preko izolacije	Promjer kabela	Težina kabela	Najmanji polumjer savijanja	Maksimalna sila povlačenja
$\text{nxmm}^2/\text{mm}^2$	mm	Mm	Mm	mm	kg/km	m	kN
1x150/95	14,1	18	54,9	64,5	3995	0,97	4,5
1x185/95	15,7	17	54,5	64,1	4026	0,96	5,5
1x240/95	18,0	16	54,8	64,4	4156	0,97	7,2
1x300/95	20,3	15	55,1	64,7	4263	1,00	9,0
1x400/95	23,0	15	57,6	67,4	4746	1,01	12,0
1x500/95	26,5	15	61,3	71,3	5287	1,07	15,0
1x600/95	30,3	15	64,5	74,8	5908	1,20	18,9
1x800/95	36,9	15	71,8	82,6	6925	1,24	24,0
1x1000/95	37,9	15	72,8	84,0	7409	1,26	30,0
1x1200/95	44,0	15	78,0	90,0	8010	1,35	36,0

Kabel 2XS(F)2Y i A2XS(F)2Y je proizveden tako da se može koristiti za polaganje u zemlju, terene sa vlažnošću, u kanalima, konzolama i ostalim mjestima gdje nisu očekivana mehanička oštećenja i gdje ne postoji mogućnost vlačnog napreznja

### 2.3.2. Konstrukcija 2XS(FL)2Y i A2XS(FL)2Y

Ovaj tip kabela predstavlja energetska kabel koji se sastoji od XLPE izolacije i PE plašta koji posjeduje uzdužnu i poprečnu vodonepropusnu izvedbu električne zaštite. Stara oznaka ovog tipa kabela glasi: XH(A)E 49, XH(A)E 49-A. Standardi koji se primjenjuju prilikom izrade ovoga kabela jesu IEC 60840 i HRN HD 632. Nazivni napon iznosi  $U_0/U = 64/100$  kV, a najviši napon mreže iznosi  $U_m = 123$  kV.

Konstrukcija ovoga tipa kabela je prikazana na slici 2.7.



Slika 2.7: Konstrukcija 2XS(FL)2Y i A2XS(FL)2Y [4]

Konstrukcija prikazana na slici 2.7 se sastoji od:

1. bakrenog ili aluminijskog vodiča koji je kompaktiran ili segmentiran uže klase 2,
2. ekrana vodiča kojeg karakterizira ekstrudirani poluvodljivi XLPE,
3. izolacije XLPE,
4. ekrana izolacije sa ekstrudiranim i poluvodljivim XPLE,
5. separatora sa bubrivom trakom sa poluvodljivim slojem,
6. čelične cjevčice koja se sastoji od svjetlovodne niti kako bi se omogućilo mjerenje temperature (DTS) od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $180^{\circ}\text{C}$  na temelju zahtjeva kupca,
7. metalnog ekrana u kojem se nalaze bakrene žice i kontraspirala od bakrene trake,
8. separatora sa bubrivom trakom sa poluvodljivim slojem,
9. laminiranog plašta Al ili Cu trake sa kopolimerom,
10. vanjskog crnog plašta HDPE.

Tablica 2.3 prikazuje izmjere za 2XS(FL)2Y, dok tablica 2.4 prikazuje izmjere za A2XS(FL)2Y.

Tablica 2.3: Izmjere za 2XS(FL)2Y [4]

Presjek vodiča i el. zaštite	Promjer vodiča	Debljina izolacije	Promjer preko izolacije	Promjer kabela	Težina kabela	Najmanji polumjer savijanja	Maksimalna sila povlačenja
$\text{nxmm}^2/\text{mm}^2$	mm	Mm	Mm	mm	kg/km	m	kN
1x150/95	14,1	18	54,9	64,9	5035	0,97	7,5
1x185/95	15,7	17	54,5	64,5	5272	0,96	9,2
1x240/95	18,0	16	54,8	64,8	5742	0,97	12,0
1x300/95	20,3	15	55,1	65,1	6210	0,98	15,0
1x400/95	23,0	15	57,6	67,4	7208	1,01	20,0
1x500/95	26,5	15	61,3	71,7	8322	1,07	25,0
1x630/95	30,3	15	64,5	75,2	9886	1,20	31,5
1x800/95	36,9	15	71,8	82,6	12042	1,24	40,0

Tablica 2.4: Izmjere za A2XS(FL)2Y [4]

Presjek vodiča i el. zaštite	Promjer vodiča	Debljina izolacije	Promjer preko izolacije	Promjer kabela	Težina kabela	Najmanji polumjer savijanja	Maksimalna sila povlačenja
$\text{nxmm}^2/\text{mm}^2$	mm	Mm	Mm	mm	kg/km	m	kN
1x150/95	14,1	18	54,9	64,9	4128	0,97	4,5
1x185/95	15,7	17	54,5	64,5	4153	0,96	5,5
1x240/95	18,0	16	54,8	64,8	4283	0,97	7,2

1x300/95	20,3	15	55,1	65,1	4397	0,98	9,0
1x400/95	23,0	15	57,6	67,4	4880	1,01	12,0
1x500/95	26,5	15	61,3	71,3	5433	1,07	15,0
1x630/95	30,3	15	64,5	75,2	6064	1,20	18,9
1x800/95	36,9	15	71,8	82,6	7100	1,24	24,0
1x1000/95	37,9	15	70,5	86,0	8000	1,30	30,0
1x1200/95	44,0	15	78,0	95,7	8350	1,40	36,0

Kabel 2XS(FL)2Y i A2XS(FL)2Y je proizveden tako da se može koristiti za polaganje u zemlju, terene sa vlažnošću i ostalim mjestima gdje nisu očekivana mehanička oštećenja i gdje ne postoji mogućnost vlačnog naprezanja.

#### **2.4. Strujno opterećenje visokonaponskih kabela**

Kada se radi o strujnom opterećenju kabela, jačina električne struje unutar kabela mora biti ograničena zbog topline koja se prilikom toga oslobađa. Prilikom strujnih opterećenja koji su veći od nazivnih, dolazi do pregrijavanja kabela koje dovodi do smanjenja životnog vijeka kabela koji je procijenjen na od 30 do 40 godina. U nastavku su prikazane dopuštene vrijednosti jačine struje koje su izračunate na temelju standarda IEC 60287:

- maksimalna temperatura vodiča iznosi 90°C,
- maksimalna temperatura zemlje iznosi 20°C,
- maksimalni specifični otpor zemlje iznosi 1,0 Km/W,
- maksimalna temperatura zraka iznosi 35°C,
- maksimalni razmak kabela iznosi 70 mm + D.

Tablica 2.5 prikazuje strujna opterećenja 110 kV kabela sa bakrenim vodičem.

Tablica 2.5: Strujna opterećenja 110 kV kabela sa bakrenim vodičem [4]

Vrsta vodiča	BAKRENI VODIČ							
	Zemlja				Zrak			
Mjesto polaganja	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
185	490	448	465	453	630	574	546	538
240	570	505	540	519	740	659	645	628
300	640	535	610	580	805	685	710	685
400	720	595	690	650	915	775	820	785
500	825	450	785	730	1060	860	945	895
630	940	705	890	810	1235	950	1085	1010
800	1055	755	1000	885	1415	1040	1235	1130

↓ - preplitanje uzemljenja,

↓ ↓ - oba kraja uzemljenja.

Tablica 2.6 prikazuje strujna opterećenja 110 kV kabela sa aluminijskim vodičem.

Tablica 2.6: Strujna opterećenja 110 kV kabela sa aluminijskim vodičem [4]

Vrsta vodiča	ALUMINIJSKI VODIČ							
	Zemlja				Zrak			
Mjesto polaganja	Linija		Trokut		Linija		trokut	
Način polaganja								
Način uzemljenja	↓	↓ ↓	↓	↓ ↓	↓	↓ ↓	↓	↓ ↓
Presjek vodiča	Strujno opterećenje							
mm <sup>2</sup>	A							
150	335	325	320	320	431	415	373	373
185	380	363	360	358	494	465	425	423
240	445	416	420	416	583	541	504	499
300	495	445	475	460	625	565	550	540
400	565	500	540	525	715	640	640	625
500	645	555	650	595	835	725	745	720
630	740	610	710	670	975	820	865	830
800	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	1140

↓ - preplitanje uzemljenja,

↓ ↓ - oba kraja uzemljenja.



### 3. POGON VISOKONAPONSKIH KABELA

Zbog stalnog porasta udjela kablskih vodova u EES-u, raste i potreba za osiguranjem njihove pouzdanosti. Prethodno navedeno se postiže pomoću praćenja karakterističnih parametara koji su u izravnoj korelaciji sa stanjem izolacije kabela. Vrlo je važno da se mjerenja na kablama provode neposredno nakon polaganja, jer se pomoću toga dobivaju podaci o karakterističnim parametrima koji predstavljaju početno ili nulto stanje. Ovi podaci omogućuju praćenje njihovih vrijednosti u sklopu održavanja tijekom radnog razdoblja i na temelju njihovih promjena također utvrđivanje trenda degradacije izolacije kabela te izolacijski otpor kablskog sustava [5].

Održavanje 110 kV kablskih vodova se do sada uglavnom svodilo na vizualni pregled, što zbog same prirode trasa nije moguće u većem opsegu, jer su kablje uglavnom položeni u otvorenom kablskom tunelu i zakopani ili položeni u kanalizacijske cijevi. Uz konvencionalne metode ispitivanja i dijagnostike kablskog sustava, moguće je korištenje novih tehnologija koje pružaju mogućnost praćenja uzdužnog temperaturnog profila i mjerenje parcijalna pražnjenja pomoću senzora. Najosnovniju metodu s kojom se provodi provjera kvalitete polaganja kabela i izrade završetaka i konektora predstavlja ispitivanje vanjskog plašta kabela nakon polaganja. Ovo ispitivanje pruža isključivo osnovne informacije o integritetu plašta.

Veću pogonska pouzdanost kabela je moguće osigurati isključivo provođenjem ispitivanja s povišenim naponom. Ispitivanje s povišenim naponom se ne provodi dosljedno zbog nedostupnosti odgovarajućih izvora napajanja ili prevelikih zahtjeva za visokom ispitnom reaktivnom snagom, koja je neophodna za ispitivanje kabela. Stoga se provodi samo alternativno 24-satno spajanje kabela na pogonski napon, a to nije smatrano ekvivalentnim ispitivanjem [5].

Kada je riječ o visokonaponskim kablama, njihov napon opreme iznosi 123 kV i više. Najviše VN kabela ugrađuje se na 110 kV naponskoj razini. U ovim slučajevima se najčešće koriste tipovi kabela A2XS(FL)2Y i A2X(F)K2Y koji se polako povlače s tržišta zbog upotrebe olova kao ekološki nepoželjnog elementa, zamjenjuje ga konstrukcija s valovitim aluminijskim ekranom tipa 2X(F)KLD2Y [5]

Dakle, osnovnu strukturu kabela čini bakreni ili aluminijski višežilni, odnosno segmentni vodič (većih presjeka  $<1200 \text{ mm}^2$ ). Na vodiču se ekstrudira zaštitni poluvodljivi sloj, zatim izolacija i preko nje ekstrudira poluvodljivi sloj. Sve se izvodi u procesu trostruke ekstruzije. Do ove točke, konstrukcija se ne mijenja i ključna je kada se radi o testiranju [5].

## **4. NORME ZA PROVEDBU ISPITIVANJA VISOKONAPONSKIH KABELA**

### **4.1. Norme**

Norme za provedbu ispitivanja visokonaponskih kabela jesu:

- IEC 60840:2011 Energetski kabeli s ekstrudiranom izolacijom i njihov pribor za nazivne napone iznad 30 kV ( $U_m = 36$  kV) do 150 kV ( $U_m = 170$  kV) - Metode ispitivanja i zahtjevi.
- IEC 62067: Energetski kabeli s ekstrudiranom izolacijom i njihov pribor za nazivne napone iznad 150 kV ( $U_m = 170$  kV) do 500 kV ( $U_m = 550$  kV) – Metode ispitivanja i zahtjevi.
- IEC 60270:2000 Tehnike ispitivanja visokog napona - Mjerenja djelomičnog pražnjenja.
- IEC 60885-3:1988 Električne metode ispitivanja električnih kabela, 3. dio: Metode ispitivanja za mjerenje djelomičnog pražnjenja na duljinama ekstrudiranog energetskog kabela.
- IEC 60270:2000 Tehnike ispitivanja visokog napona - Mjerenja djelomičnog pražnjenja.
- IEC 60060-3:2006: Tehnike ispitivanja visokog napona, 3. dio: Definicije i zahtjevi za ispitivanje na licu mjesta.

Ispitivanje kabela se provodi na temelju [1]:

- norme HRN HD 632 S1:2001 – Energetski kabeli s brizganom izolacijom i njihov pribor za nazivne napone iznad 36 kV ( $U_m = 42$  kV) do 150 kV ( $U_m = 170$  kV) (HD 632 S1:1998),
- norme HRN HD 632 S1:2001/A1:2007 – Energetski kabeli s ekstrudiranom izolacijom i njihov pribor za nazivne napone iznad 36 kV ( $U_m = 42$  kV) do i uključivo 150 kV ( $U_m = 170$  kV) (HD 632 S1:1998/A1:2002),
- norme HRN IEC 60229:2001 – Ispitivanje brizganoga plašta kabela koji ima posebnu zaštitnu funkciju (IEC 60229:1982)
- norme HRN EN 60229:2008 – Električni kabeli – Ispitivanje ekstrudiranih plašteva posebne zaštitne namjene (IEC 60229:2007; EN 60229:2008)

- HRN IEC 60840:2001 – Energetski kabeli s brizganom izolacijom i njihov pribor za nazivne napone iznad 30 kV ( $U_m=36$  kV) do 150 kV ( $U_m=170$  kV) – Ispitne metode i zahtjevi (IEC 60840:1999)
- norme IEC 62067 Ed.2: Energetski kabeli s ekstrudiranom izolacijom i njihov pribor za nazivne napone iznad 150 kV ( $U_m=170$  kV) pa do 500 kV ( $U_m=550$  kV).

Prethodno navedene norme i standardi uređuju način i postupak ispitivanja kao i električne i neelektrične ispitne vrijednosti. Ove norme i standardi se ne odnose na dizajn i konstrukcijska rješenja kojima se bave proizvođači kabela i kablenskog pribora. Norma IEC 60840 propisuje rutinska ispitivanja kabela i glavne izolacije pribora za montažu, shodno tome na svakoj duljini kabela koja je proizvedena je potrebno provesti ispitivanja poput [14]:

- ispitivanja parcijalnih izbijanja,
- ispitivanja putem visokog napona,
- električnih ispitivanja vanjskog zaštitnog plašta na kabelu.

Način i redoslijed provođenja prethodno navedenih ispitivanja ovisi o odabranom proizvođaču opreme. Ispitivanje parcijalnih izbijanja se provodi na način da se ispitni napon polagano diže na  $1.75 U_0$  i tako se održava deset sekundi, nakon čega se postupno smanjuje na  $1.5 U_0$ . Ukoliko se pokaže da je kabel ispravan, on ne smije na  $1.5 U_0$  pokazivati nikakve znakove izbijanja koji su veći od propisanih vrijednosti koje vrijede za normalan pogon. Ispitivanje putem visokog napona se izvodi na sobnoj temperaturi pomoću izmjeničnog ispitnog napona nazivne frekvencije. Ovim ispitivanjem se ispitni napon polagano podiže na  $2.5 U_0$  te se trideset minuta ostavlja na tom naponu između vodiča i ekrana. Najnoviji standard IEC 60840/62067 nalaže kako se nakon toga ne bi trebao dogoditi lom izolacije [14].

Na temelju norme IEC 60229 se provodi električno ispitivanje vanjskog zaštitnog plašta preko plašta koji se nalazi na kabelu.

Norma IEC 60840 propisuje specijalno ispitivanje kabela koja obuhvaća ispitivanja i mjerenja poput:

- ispitivanja vodiča,
- mjerenja električnog otpora i metalnog ekrana,

- mjerenja debljine izolacije i vanjskog zaštitnog plašta,
- mjerenja promjera,
- ispitivanja točke na XLPE izolaciji koja je najtoplija,
- mjerenja kapaciteta.

Norma HRN EN 60228:2007 – Vodiči za kabele (IEC 60228:2004; EN 60228:2005) određuje zahtjeve ispitivanja vodiča koji se provjeravaju putem inspekcije i mjerenja.

Kako bi se provelo mjerenje električnog otpora vodiča i metalnog ekrana, mora se održavati ispitna soba na istoj temperaturi kontinuirano i minimalno 12 sati prije samog početka provedbe postupka ispitivanja. Ukoliko se temperatura vodiča razlikuje od sobne temperature, otpor je potrebno mjeriti nakon što je kabel proveo u ispitnoj sobi minimalno 24 sata. Isto tako, otpor je moguće izmjeriti na temelju uzorka vodiča ili metalnog ekrana koji je bio u tekućoj kupki koju je karakterizirala konstantna i kontrolirana temperatura minimalno jedan sat [14].

Debljina izolacije i vanjskog zaštitnog plašta se provodi tako što se uzima određena duljina kabela sa jednog kraja, zatim se pregledava i ustanovljuje da li je došlo do oštećenja, ukoliko je došlo do oštećenja, potrebno je ukloniti dio koji je oštećen. Minimalno izmjerena debljina ne smije padati ispod 90% nazivne debljine kako prikazuju formule (4.1 i 4.2):

$$t_{min} \geq 0.90 t_n \quad (3,3) \quad (4.1)$$

$$\frac{t_{min} \geq 0.90 t_n}{t_{max}} \leq 0.15 \quad (4.2)$$

U ovim formulama izrazi označavaju [14]:

- $t_{max}$  – maksimalna duljina u mm,
- $t_{min}$  – minimalna duljina u mm,
- $t_n$  – nazivna debljina u mm.

Potrebno je mjeriti  $t_{max}$  i  $t_{min}$  na istom presjeku izolacije. Debljina izolacije na podrazumijeva debljinu poluvodljivih zaslona na vodiču i preko izolacije. Na temelju

zahtjeva koji su orijentirani na vanjski plašt kabela, izmjerena debljina plašta ne smije ići ispod 85% nazivne debljine više od 0,1 mm, kako je i prikazano formulom 4.3.

$$t_{min} \geq 0.85 t_n - 0.1 \quad (4.3)$$

U ovoj formuli izrazi označavaju:

- $t_{min}$  – minimalna duljina u mm,
- $t_n$  – nazivna debljina u mm.

Pored toga, prosjek vrijednosti koja je zaokružena na 0,1 mm ne smije biti manja od vrijednosti nazivne debljine. Prethodno navedeno se ne primjenjuje na plašt koji je stavljen na nepravilnoj površini koju čine valoviti metalni plašt, metalni zaslon žica i trake.

Kada je riječ o mjerenju promjera jezgre ili ukupnom promjeru kabela, ono se izvodi na temelju zahtjeva investitora.

Što se tiče ispitivanja točke na XLPE izolaciji koja je najtoplija, koriste se uzorci iz dijela izolacije prilikom čega je smatrano kako je stupanj umrežavanja najniži prilikom primijenjenog postupka stvrdnjavanja.

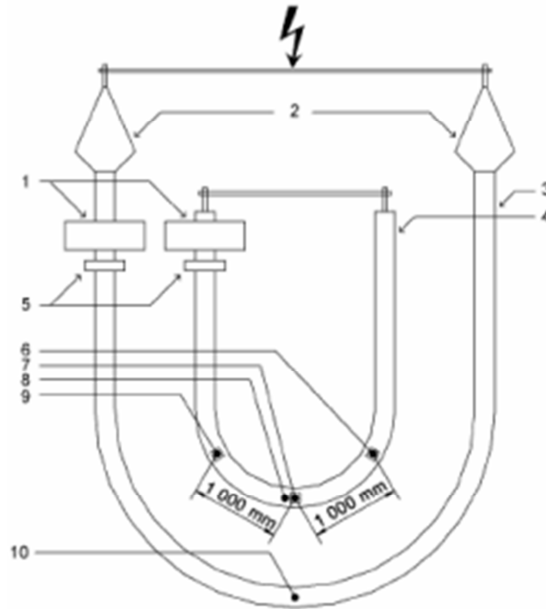
Mjerenje kapaciteta se provodi između vodiča i metalnog ekrana na sobnoj temperaturi, dok se temperature okoline zabilježava sa ostalim podacima ispitivanja. Vrijednost kapaciteta koja je izmjerena se korigira na duljinu od 1 km i ne smije biti veća od deklarirane nominalne vrijednosti više od 8% [14].

Norma IEC 60840 propisuje tipsko ispitivanje (slika 4.8) kabela koje obuhvaća električna i neelektrična ispitivanja. Električna ispitivanja podrazumijevaju ispitivanja i mjerenja poput:

- ispitivanja parcijalnih izbijanja,
- ispitivanja na savijanje nakon čega se ponovno primjenjuje ispitivanje parcijalnih izbijanja
- mjerenja tg  $\delta$ ,
- ispitivanja putem cikličkih grijanja nakon čega se ponovno primjenjuje ispitivanje parcijalnih izbijanja,

- ispitivanja udarnim naponom nakon čega se primjenjuje ispitivanje napona,
- naponska ispitivanja

U nastavku je prikazan primjer jedne ispitne petlje za tipsko ispitivanje kabela i kablenskog pribora.



Slika 4.1: Ispitna petlja za tipsko ispitivanje kabela i kablenskog pribora [1]

Legenda slike:

1. strujni indukcijski transformatori,
2. kablenski završetci,
3. ispitivani kabel,
4. referentni kabel ( $\geq 10$  m)
5. strujni mjerni transformatori,
6. termosonda 3c (vodič),
7. termosonda 1c (vodič),
8. termosonda 1s (ekran),
9. termosonda 2c (vodič),
10. termosonda (ekran).

Ispitivanje poslije polaganja je ispitivanje koje se provodi na kabelu koji je potpuno instaliran, skupa sa svim završnim i spojnim uređajima na novoj instalaciji. Prilikom ispitivanja poslije polaganja se provodi:

- naponsko ispitivanje izolacije,
- naponsko ispitivanje plašta.

Naponsko ispitivanje izolacije se provodi:

-izmjeničnim naponom frekvencije od 20 – 300 Hz  $2,5 U_0$  /1 sat ili

-izmjeničnim naponom  $U_0/24$  sata ili

-istosmjernim naponom  $3U_0$  / 15 minuta.

Naponsko ispitivanje plašta se provodi:

-istosmjernim naponom 10 kV/1 min s ciljem provjere oštećenja plašta koje mogu nastati prilikom skladištenja ili polaganja.

#### **4.2. Ispitna oprema**

Procedura ispitivanja se prilagođava prema raznim tipovima uređaja koji posjeduju svoje karakteristike, no postoje zajednička pravila koja ujedno predstavljaju cilj svake procedure ispitivanja. Pravila obuhvaćaju :

- vrste ispitivanja na temelju karaktera napona koje se mogu podijeliti na istosmjerno ispitivanje, izmjenično ispitivanje i kombinirano ispitivanje,
- broj potrebnih ponavljanja postupka ispitivanja,
- vremenski razmak između ponavljanja postupka ispitivanja.

Prethodno navedena pravila su određena od strane stručnjaka koji su zaduženi za provođenje ispitivanja ispitne opreme uzimajući u obzir čimbenike poput:

- propisane točnosti mjernih rezultata koji su dobiveni ispitivanjem,
- slučajne prirode ponašanja objekta koji se ispituje te ovisnost polariteta karakteristika koje su izmjerene,
- mogućnosti smanjenja vrijednosti izmjerenih rezultata u procesu ponavljanja postupka ispitivanja.

Prije nego što se započne sa provedbom postupka procedure ispitivanja, ispitni uređaji i oprema obavezno moraju proći vizualne preglede koji obuhvaćaju provjeru serijskog broja uređaja, datuma i godine proizvodnje, vremena od posljednjeg umjeravanja te eventualnih mehaničkih oštećenja. S ciljem dobivanja kvalitetnih karakteristika dielektričnog proboja



unutar uređaja, prilikom same pripreme postupka ispitivanja, igraju važnu ulogu čimbenici poput:

- sigurnosne udaljenosti predmeta ispitivanja od ostalih objekata pod naponom,
- visinske udaljenosti od tla,
- povoljnog rasporeda i razmaka među visokonaponskih ispitnih vodova.

### **4.3. Metode i vrste ispitivanja**

Ispitivanje visokonaponskih kabela obuhvaća dva tipa ispitivanja [14]:

- destruktivan tip ispitivanja visokonaponskih kabela,
- nedestruktivan tip ispitivanja visokonaponskih kabela.

Destruktivan tip ispitivanja visokonaponskih kabela obuhvaća ispitivanje kabela istosmjernim naponom i ispitivanje izmjeničnim naponom vrlo male frekvencije. Ovaj tip se koristi s ciljem otkrivanja slabih mjesta u izolaciji visokonaponskog kabela. No, ovaj tip nema mogućnost otkrivanja i određivanja životnog vijeka kabela. Shodno tome, s ciljem bolje procjene stanja visokonaponskih kabela koji su položeni, poželjno je koristiti nedestruktivan tip ispitivanja visokonaponskih kabela.

Nedestruktivan tip ispitivanja visokonaponskih kabela obuhvaća dvije različite metode ispitivanja. Prva metoda podrazumijeva procjenjivanje stanja kabela, a druga metoda podrazumijeva detekciju defekata unutar kabela. Ispitivanje parcijalnih izbijanja predstavlja metodu koja je smatrana najučinkovitijom kada je riječ o ispitivanju visokonaponskih kabela. Ovaj oblik ispitivanja je moguće izvršiti unutar i izvan pogona.

#### **4.3.1. Ispitivanje istosmjernim naponom**

Kako je ranije navedeno, ovaj tip ispitivanja visokonaponskih kabela obuhvaća ispitivanje putem istosmjernog napona i ispitivanje putem napona vrlo male frekvencije. Kada je riječ o ispitivanju putem istosmjernog napona, ono se odvija tako što se unutar propisanog vremenskog trajanja kabel izlaže narinutom naponu (niskom ili visokom). Ako se ispitivanje odvija u uvjetima niskog narinutog napona, potrebno je koristiti opremu koja je previđena za mjerenje otpora izolacije, isto tako je potrebno faze koje ne sudjeluju u

ispitivanju uzemljiti i zaštititi krajeve kabela. Potrebno je bilježiti rezultate koji su dobiveni u postupku ispitivanja prilikom različitih razina napona u različitim vremenskim trajanjima. Posljednji dobiveni rezultati mjerenja predstavljaju pravodobni otpor izolacije kabela ovisno o vremenskim uvjetima [14].

Putem ispravljača se, u opremi za ispitivanje, ulazni izmjenični napon pretvara u istosmjerni napon, dok se na izlazu, putem podešavanja izmjeničnog napona na ulazu, dobiva istosmjerni i promjenjivi napon. Mjernim transformatorom se provodi postupak mjerenja izlazne struje ispravljača na ulazu ili visokonaponskoj strani. Putem ispitne opreme, koja se koristi s ciljem ispitivanja, je moguće provoditi postupak sljedećih vrsta ispitivanja [14]:

- ispitivanje podnosivim istosmjernim naponom – kabel se izlaže određenom ispitnom naponu unutar propisanog vremenskog perioda koje ovisi o naponskoj razini, kabel je smatran ispravnim ako tokom ispitivanja nije došlo do kvara;
- ispitivanje promjene struje odvođenja – provodi se praćenje promjene struje na određenom ispitnom naponu unutar određenog vremenskog perioda, prilikom čega komponenta promjene struje predstavlja pokazatelj stanja u kojem se sustav nalazi, čiji apsolutni iznos nije previše značajan;
- ispitivanje promjene struje u ovisnosti o naponu – ispitni napon se postupno povećava sve do maksimalnog iznosa, mjeri se stacionarna vrijednost struje, ako rezultat ispitivanja dovede do nelinearnosti, smatra se kako postoji defekt unutar izolacijskog sustava.

#### 4.3.2. Ispitivanje izmjeničnim naponom vrlo niske frekvencije

Ispitivanje putem napona vrlo niske frekvencije se najčešće koristi kod provođenja postupka ispitivanja prije puštanja novog visokonaponskog kabela u pogon s ciljem provjere mogućih oštećenja kabela koja su mogla nastati tokom polaganja i transporta te provjere kabelskih završetaka i spojnica. Ovo ispitivanje je moguće provoditi i s ciljem periodičkog ispitivanja stanja izolacije u svrhu smanjenja broja kvarova. Ova vrsta ispitivanja podrazumijeva:

- ispitivanje putem podnošenog napona vrlo niske frekvencije – nastoji se izazvati proboj na mjestima na kojima je oštećena izolacija, u slučaju pronalaska kvara, isti se popravljaju i ispitivanje se nastavlja.

- dijagnostička ispitivanja putem napona vrlo niske frekvencije – nastoji se dati procjena ispravnosti kabela u svrhu daljnjeg rada tako što se uspoređuju rezultati dijagnostičkog ispitivanja i tvorničkog ispitivanja kabela.

Kako bi se provela ova metoda ispitivanja, korišten je izmjenični napon frekvencije od 0,01 – 1 Hz [14].

#### 4.3.3. Ispitivanje izmjeničnim naponom

Kada se radi o ispitivanju novih kabela i kabelaške opreme, obavezno je potrebno koristiti ispitivanje putem izmjeničnog napona na mrežnoj frekvenciji, jer je raspodjela napreznja unutar izolacije jednaka raspodjeli napreznja koje se nalaze u pogonskim uvjetima. Mjerni transformatori nisu pogodni za ispitivanje na terenu, zbog čega je moguće koristiti paralelne ili serijske rezonantne krugove. Putem ove metode je moguće izazvati parcijalna izbijanja te izmjeriti faktor gubitaka  $\tan \delta$  u dijagnostičke svrhe. Potrebna oprema za ispitivanje obuhvaća standardni mjerni transformator koji se sastoji od regulatora izlaznog napona putem kojeg se ispitni napon održava konstantnim, rezonantnih krugova, nadstrujnih zaštitnih releja. Ispitivanje započinje sa uključivanjem ispitne opreme, a podizanje napona se odvija u kratkim i vrlo sporim koracima sve do određene vrijednosti ispitnog napona koji se unutar određenog vremenskog perioda održava konstantnim. Nakon što napon dosegne 5% vrijednosti ispitnog napona, potrebno je sinkronizirati sustav. Podizanje i spuštanje napona se odvija na temelju 1 kV/s na mrežnoj frekvenciji. Testiranje kod novih kabela traje 15 minuta, a kada je riječ o održavanju onda traje od 5 – 15 minuta [14].

#### 4.3.4. Ispitivanje parcijalnih izbijanja

Ispitivanje parcijalnih izbijanja se provodi s ciljem određivanja slabih mjesta u izolaciji kabela koji uzrokuju parcijalna izbijanja u dielektriku, koje se događa najčešće na mjestima koje karakterizira nehomogenost izolacijskog materijala. Električna izbijanja u izolaciji karakterizira pojava jako kratkih impulsa frekvencije od 0 – 5 MHz. Ova vrsta ispitivanja se provodi u tvornici, na terenu, izvan pogona i tokom pogona. Mjerni rezultati koji su dobiveni putem ispitivanja na terenu pomažu prilikom zaključivanja o vrsti

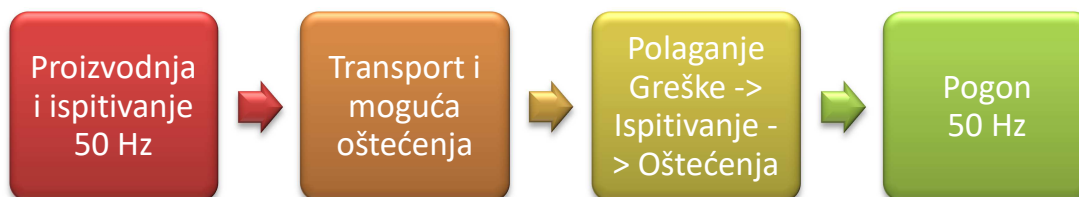
oštećenja te određivanje njihove lokacije unutar kabela. Ako su dobiveni rezultati tokom ispitivanja na terenu jednaki rezultatima koji su dobiveni tokom ispitivanja u tvornici, izolacija je dobra [14].

Ispitivanje parcijalnih izbijanja se provodi na nazivnom naponu, prvo se kabel nabija na visok i istosmjerni napon, nakon čega se ispražnjuje pomoću prigušnice koja je serijski spojena. Shodno tome, između prigušnice i pogonskog kapaciteta kabela dolazi do serijske rezonance frekvencije od 50 – 1000 Hz koja traje od 10 – 100 i više  $\mu s$ , ovisno o parametrima kabela. U tom vremenu dolazi do porasta polja i parcijalnih izbijanja na svim slabim mjestima, te ih je moguće detektirati putem odgovarajuće opreme. Mjesta na kabelima na kojima se odvijaju parcijalna izbijanja, karakterizira stvaranje vala u smjeru mjesta na kojima je priključena ispitna oprema i stvaranje vala u smjeru slobodnog kretanja u kabele, rezultat toga je prigušenje viših frekvencija i amplitude vala. Drugi val uvijek dolazi nakon prvog vala, zbog čega su njegovi impulsi niži i širi. Mjesta na kojima se odvijaju parcijalna izbijanja se određuju sa  $\Delta t$  uz točnost od  $\pm 2m$  [14].

Oprema za ispitivanje parcijalnih izbijanja se sastoji od PD senzora čiji sastavni dijelovi jesu antena, kapacitivne spojnice ili induktivni pribor. Ova metoda pomaže prilikom detektiranja skrivenih defekata i mjesta u izolaciji na kojima postoji mogućnost parcijalnih izbijanja koje mogu dovesti do kvara. Zamjena kabla je potrebna ukoliko je putem mjerenja utvrđen veći broj loših segmenata [14].

## 5. ISPITIVANJA VISOKONAPONSKIH KABELA

Ispitivanje VN kabela započinje u tvornici proizvođača prilikom, čega se provodi ispitivanje komada i uzoraka na svim kabelima koji su namotani na bubanj prije nego što se distribuiraju kupcu. Ispitivanja VN kabela se mogu podijeliti na električna i neelektrična ispitivanja. U skladu sa standardom IEC 60840 (standard koji jamči kvalitetu kabela), kabel mora proći tvornički test napona  $2,5 \times U_0$ , test djelomičnog pražnjenja (PD) i test plašta. U ovom slučaju se ispitivanje dielektričnih gubitaka kabela ne provodi, ali neki operateri sustava zahtijevaju ovo ispitivanje u svojim internim pravilima, tehničkim specifikacijama za javnu nabavu [5]. Slika 5.1. prikazuje tijek kabela kroz životni vijek u radnim uvjetima.



Slika 5.1: Tijek kabela kroz životni vijek u radnim uvjetima [5]

Naponsko ispitivanje glavne izolacije (110 kV), kojim se određuje životni vijek kabela, provodi se na način da ispitni napon na vodiču do metalnog zaslona iznosi 160 kV mrežne frekvencije između 45 Hz i 65 Hz za u trajanju od 30 min. Tijekom ispitivanja napona provode se i mjerenja parcijalnih pražnjenja koja predstavljaju prvo mjerenje stanja kabela [5].

Ispitivanja se također provode i na plaštu, sukladno s procedurom standarda IEC 60229, odnosno istosmjernim naponom od 25 kV između plašta i metalnog zaslona u trajanju od jedne minute. Nakon završenog ispitivanja uzoraka, kabeli se otpremaju iz tvornice. Nakon dolaska na teren, svaki bubanj s kabelima mora biti propisno provjeren zbog oštećenja omotača tijekom transporta. Spomenuto mjerenje se provodi na temelju istog principa kao i tvornički, osim što je napon manji i određuje se na temelju debljine plašta od 4 kV/mm, ali ne više od 10 kV istosmjernog napona [5].

Prilikom ispitivanja nije poznato stanje glavne izolacije jer testiranje kabela na oštećenje tijekom transporta to ne pokazuje, poput primjerice veće površinske sile na plaštu, koja ne uzrokuje abraziju ili probijanje, ali utječe na geometriju ( $C_x$ ,  $R_x$ ,  $PD$ ,  $\text{tg } \delta$ ). Prethodno navedeno neće biti primijećeno prilikom ispitivanja plašta s 10 kV istosmjernim naponom. Nakon uspješnog testiranja plašta slijedi polaganje kabela i prije svakog zatrpavanja ponavljanje i kontrola istosmjernim naponom kao indikatorom oštećenja plašta [5].

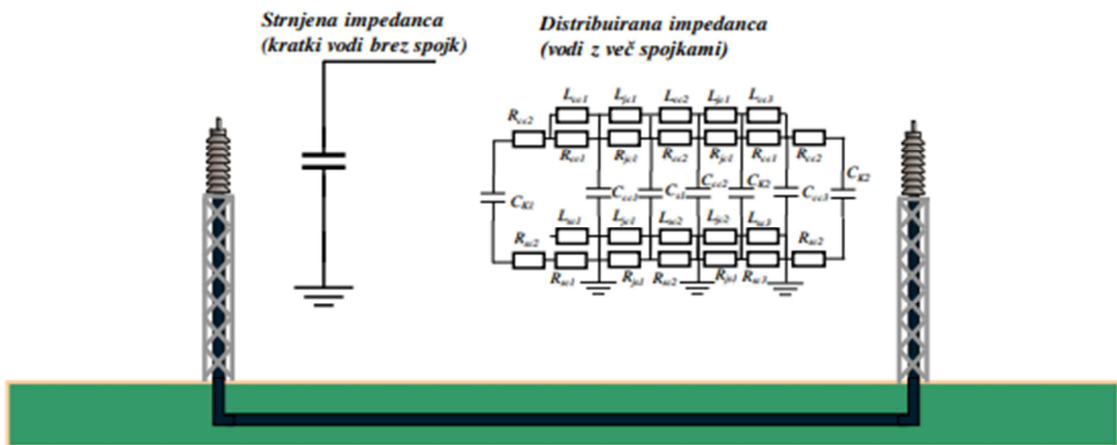
Nakon završetka montaže završnih kapa i spojnica te zatrpavanja, plašt se ponovno testira, a zatim se ispituje glavna izolacija. Prema normi koja je vezana uz kabele od 110 kV i služi za provjeru konstrukcije i provjeru sukladnosti sa zahtjevima, je propisano kako se glavno ispitivanje izolacije provodi i nakon završetka polaganja. Glavni naglasak je u ovom slučaju na glavnom ispitivanju izolacije naponom između 20 Hz i 300 Hz i naponskom razinom od 128 kV tijekom sat vremena. Ukoliko spomenuti test nije dostupan, koristi se alternativa koja podrazumijeva spuštanje uređaja na radni napon tijekom 24 sata. Prethodno navedenog ne predstavlja "ozbiljan" test, jer ne otkriva manje nedostatke koji nastaju zbog nečistoća iz pogrešne proizvodnje završnih kapa ili spojnica, već samo one koji su toliko izraženi da u svakom slučaju uzrokuju proboj [5].

Prilikom prethodno navedenog ispitivanja može doći do neželjenih posljedica posebno ako kupac odluči izvesti napajanje u obliku normalnog radnog stanja, koje dovodi do neželjenih prijelaznih prenapona prilikom kvara. Navedeni "test" također ne pruža informacije o stanju izolacije, ni prilikom distribuiranog mjerenja PD-a, s obzirom na to da je poznato kako PDIV javlja samo prilikom vrijednosti od oko  $1,5 \times U_0$ . Shodno tome, glavna izolacija kabela počinje djelovati i opskrbljivati elemente VN mreže, bez znanja o njezinom stanju. Transformator je kao element mreže često nevažan, ali dolazi do njegove svjesnosti u trenutku kada primjerice dođe do kvara ove izolacije. Upotreba pogonskog napona predstavlja jednodnevnu garanciju i kao takva predstavlja ekstremnu mogućnost provjere stanja izolacije nakon ugradnje [5]. Uzroci oštećenja izolacije su prikazani slikom 5.2.



Slika 5.2: Uzroci oštećenja izolacije [5]

Provođenje testiranja izolacije se provodi zbog oštećenja glavne izolacije koja ne mora biti vidljiva golim okom. Oštećenje je najčešće uzrokovano ljudskim faktorom, odnosno događa se prilikom izrade završetaka i konektora. Također postoje i slučajevi kada se zbog nedosljednosti ispitivanja u tvornici (ispitivanja koja se ne provode u sklopu FAT prijema) testiranja), kvarovi otkrivaju na samom kabelu. Nakon puštanja u rad, u najvećem broju slučajeva (>90%), završava provjera stanja glavne izolacije kabelskog sustava [5].



Slika 5.3: Prikaz VN kabela s distribuiranom impedancijama [5]

Prilikom ispitivanja kabela na terenu, sa stajališta PD, pretpostavljeno je kako je predmet ispitivanja predstavljen pomoću raspodijeljenih impedancija, a ne koncentriranim kapacitetom (slika 5.3). Shodno tome, princip mjerenja prema konvencionalnoj metodi mjerenja PD (prema IEC 60270) nije moguće primijeniti na sve duljine. Za ispitni objekt lumped kapacitivnosti, inducirana struja zbog djelomičnog pražnjenja terminala proporcionalna je struji na mjestu gdje se pojavljuju, dok za ispitni objekt distribuirane impedancije inducirana struja na terminalima nije jednaka struji uzrokovanoj parcijalnih pražnjenja (nije proporcionalno parcijalnim pražnjenjima) na mjestu gdje se javljaju i stoga ne mogu biti kriterij za razinu parcijalnih pražnjenja [5].

Osjetljivost metode prema IEC 60270 jednaka je razini smetnje, koja može biti vrlo visoka u terenskim mjerenjima. Stoga se konvencionalna metoda koristi uglavnom za laboratorijska ispitivanja i kratke duljine kabela, dok se za veće duljine i posebno one s više konektora koriste nekonvencionalne metode koje se mogu podijeliti na [5]:

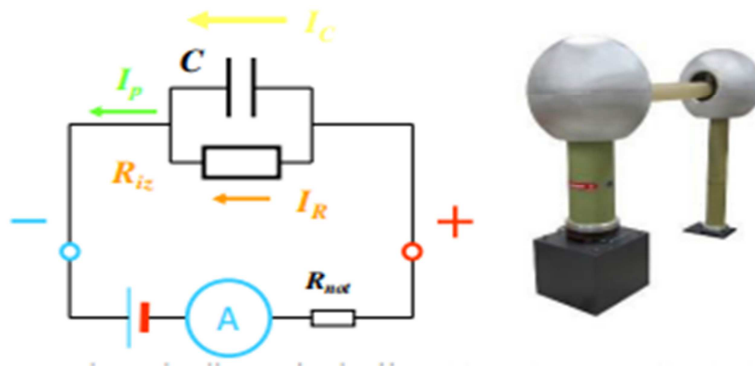
- kemijske,
- mehaničke (akustičke),
- optičke (fotografski postupci, promatranje) i
- električne (mjerenje strujnih impulsa - HF, VHF ili UHF).

Prethodno navedene metode se također koriste za distribuirano mjerenje na izloženim dijelovima (spojnice, završeci) pomoću visokofrekventnih strujnih pretvarača, tj. mjerenje impulsa električne struje. Frekvencijski raspon konvencionalne metode je ili uskopojasni od 9 kHz do 30 Hz s frekvencijom < 500 kHz ili širokopojasni od 100 kHz do 400 kHz s frekvencijom < 1 MHz. Frekvencijski raspon nekonvencionalne metode znatno je širi od desetaka kHz do nekoliko stotina MHz i frekvencije od 500 MHz. Budući da standardna metoda prema IEC 60270 pretpostavlja da se kabel uglavnom ponaša kao koncentrirani kapacitet, njegova je upotreba moguća u slučaju manjih duljina kabela. Dulji kabeli duljine preko 1000 m ponašaju se kao raspodijeljena impedancija, što zahtijeva korištenje nekonvencionalne metode [5].

### **5.1. Ispitivanja VN kabela prema vrsti ispitnog sustava**

U prošlosti su se ispitivanja izolacije kabela provodila pomoću istosmjernih sustava napajanja, uglavnom zbog jednostavne i pristupačne opreme za ispitivanje. Ispitivanje glavne izolacije istosmjernih kabela nakon polaganja više sastavni dio standarada koji pokrivaju VN kabele, zbog čega ispitivanje istosmjernom strujom nije preporučeno. Uzroci oštećenja izolacije su prikazani slikom 5.4.





Slika 5.4: Uzroci oštećenja izolacije [5]

Ispitivanje izravnim naponom posjeduje sposobnost identificiranja samo velika oštećenja, odnosno ukoliko je oštećeno više od 70% izolacije ili završetka uzrokovanih polaganjem kabela i izvođenjem spojnica. Uz njega nije moguće dati ocjenu kvalitete izolacije kabela. Ispitivanje se provodi pomoću spajanja istosmjernog napona  $3 \times U_0$  između vodiča i metalnog zaslona koji je spojen na masu u trajanju od 15 minuta. Na početku, zbog samog spajanja, postoji velika struja punjenja koja se sastoji od komponente struje polarizacije, kapacitivne struje i struje gubitka na glavnoj izolaciji. Navedena struja s vremenom opada, ponajviše zbog kapacitivne struje, koja brzo prestaje, a polarizacija traje gotovo do kraja ispitivanja, pa na kraju ostaje samo struja gubitka kroz glavnu izolaciju [5].

Nakon završetka ispitivanja, vodič kabela je potrebno isprazniti, odnosno uzemljiti preko visokoomskog otpornika (0,1 - 1 M $\Omega$ ) sve dok napon ne padne na zanemarivu vrijednost (< 1 kV), zatim se vodič izravno spaja na ekran i utemeljuje na 12 do 24 ed. Prethodno navedeno osigurava potpuno pražnjenje kabela. U slučaju da tijekom ispitivanja nije došlo do proboja izolacije kabela, kabel je pravilno položen i daljnja električna ispitivanja nisu potrebna. U suprotnom je kabel potrebno pregledati i ispraviti pogrešku. U slučaju da tijekom ispitivanja dođe do vanjskog skoka na završecima kabela, generiraju se putujući valovi koji mogu oštetiti izolaciju kabela. Mogućnost vanjskog preskakanja kabela završetaka smanjuje se ako se oni temeljito očiste i osuše te ako se mjerenje provodi u povoljnim atmosferskim uvjetima (minimalna vlažnost i onečišćenje) [5].

Poznati su slučajevi kada je do kvara izolacije kabela došlo u normalnim radnim uvjetima odmah nakon ispitivanja kabela visokim istosmjernim naponom. Već 90-ih godina prošlog stoljeća EPRI je utvrdio (izvješće TR-101245 koje datira iz 1993. godine) da su kabeli koji već rade na mrežnoj frekvenciji značajno izloženi ispitivanju istosmjerne struje, a razlog

tome je polarizacija na istosmjernom naponu i ponovno puštanje u rad s mrežnim naponom. Budući da većinu vremena do depolarizacije nikad nije došlo u potpunosti, izolacija je bila izložena zarobljenom naboju koji je povećao šanse za kvar izolacije kada je spojena na izmjeničnu struju [5].

#### 5.1.1. Ispitivanje izmjeničnim naponom prema načinu kompenzacije jalove snage kabela

Ispitivanje se temelji na tri različite metode napajanja i kompenzacije kapacitivnog karaktera kablskih sustava. U svim slučajevima postoje slične tendencije, ali se dijele prema samoj provedbi. Prvi način koji podrazumijeva napajanje transformatorima, izvediv je samo prilikom ispitivanja malih duljina, dok prilikom polaganja kabela većih duljina zbog velikog kapaciteta nije moguće provođenje ispitivanja pomoću izmjeničnog napona industrijske frekvencije, jer zahtijeva potrebne izvore struje vrlo visoke snage, što nije ekonomski opravdano. Shodno tome, razvijeni su ispitni sustavi koji kompenziraju kapacitivnu jalovu snagu kabela posebnim zavojnicama koje promjenom induktiviteta ili frekvencije cijeli sustav približavaju rezonanciji. Ovisno o različitim standardima (IEC 60840, HD 632 S3 ili IEEE standardi), postoje različite razine napona s kojima se provodi ispitivanje [5].



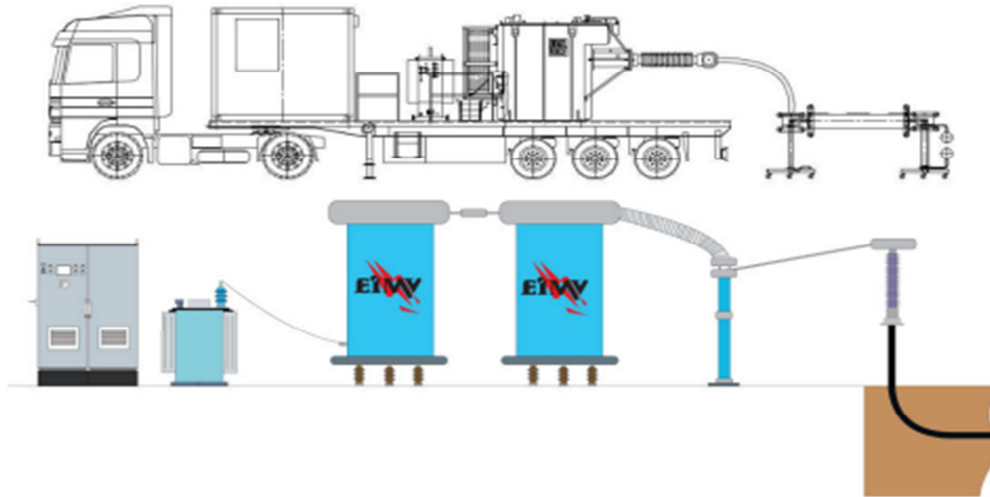
Slika 5.5: Demonstracija upotrebe oblika napona za izvođenje ispitivanja napona prema metodi rezonancije i ovisnosti [5]

Potrebno je napomenuti kako se većina operatera sustava u svijetu pridržava preporuka i tehničkih brošura CIGRE-a, koji predstavljaju temelj standarda IEC 60840. Visina ispitnog napona je postavljena na  $2 \times U_0$ , a vrijeme ispitivanja iznosi 60 minuta, odnosno sat vremena. Principi napajanja koji omogućuju kompenzaciju jalove snage posjeduju promjenjivi induktivitet, prilikom čega je potrebna masa sustava od 3 do 10 kg/kVA, te s promjenjivom frekvencijom [5].

Masa sustava u potonjem slučaju znatno je manja i kreće se od 0,5 do 2 kg/kVA koje pruža mogućnost da se ispitni sustav napaja trofazno i izravno iz niskonaponske mreže. Jedini nedostatak metode promjenjive frekvencije predstavlja odstupanje ispitne frekvencije od radne frekvencije. Donja i gornja granična frekvencija su odabrane tako da su  $\sqrt{2}$  puta niže (35 Hz) odnosno više (71 Hz) od radne frekvencije. Prethodno navedeno je omogućeno atenuatorom čiji induktivitet posjeduje mogućnost mijenjanja između 20 i 80 H. Predmetnom metodom moguće je ispitati kabele od 110 kV čiji kapacitet varira od 0,15  $\mu\text{F}/\text{km}$  do 0,3  $\mu\text{F}/\text{km}$ . S kraćim kabelima, sve faze je moguće testirati u isto vrijeme, čime se povećava kapacitet ispitnog komada i posljedično smanjuje frekvencija. Metoda predstavlja najbolji kompromis između oblika ispitnog napona i mase ispitnog sustava. Postoji niz sustava potencijalno prihvatljivih za testiranje na terenu, uključujući ACRL, koji je sustav promjenjivog induktiviteta na fiksnoj frekvenciji od 50 Hz, i ACRF, koji je sustav promjenjive frekvencije između 20 Hz i 300 Hz. Glavni razlog odlučivanja između ove dvije metode svakako je težina koju predstavljaju prigušivači odnosno cijeli sustav [5].

ACRF sustav se sastoji od pretvarača frekvencije spojenog na vanjski izvor napajanja, koji je spojen na uzbudni transformator, koji zajedno omogućavaju frekvencijski napon između 20 i 300 Hz, zatim fiksni prigušivač i djelitelj napona. Rezonancija se postiže podešavanjem frekvencije na takav način da se postigne vlastita frekvencija titrajnog kruga određena  $C_x$  (onaj koji se ispituje) i induktivitet prigušnice  $L$ .

Izgled rezonantnog ACRF rezonantnog sustava napajanja je prikazan slikom 5.6.

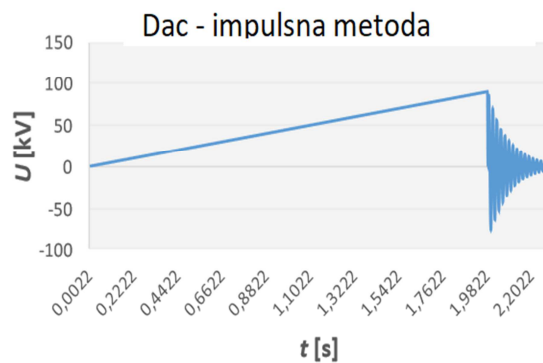


Slika 5.6: ACRF rezonantni sustav snage promjenjive frekvencije [5]

### 5.1.2. Ispitivanje kabela impulsnim naponom

Princip DAC metode ispitivanja (slika 5.7) temelji se na korištenju izvora istosmjernog napona, koji napaja kabelski vod (kapacitivnost) do vrijednosti ispitnog napona, nakon čega se kabelski vod (kapacitivnost kabela) prazni kroz odgovarajući induktivitet (prigušivač). Punjenje kabela (kapacitivnost) se provodi pomoću podizanja napona u obliku rampe. Ovaj napon ima jednosmjerni karakter, jer se polaritet ne mijenja [5].

Metoda je podržana za HV kabele u standardu IEEE 400.4, ali ima dosta nedostataka, uključujući izolacijsko naprezanje tijekom rampnog opterećenja [5].



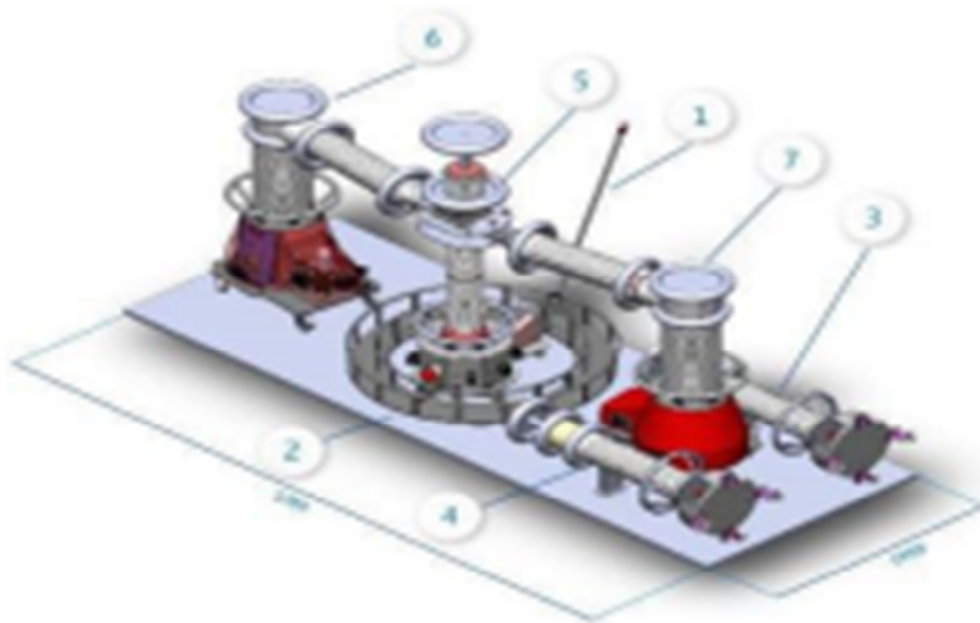
Slika 5.7: ACRF rezonantni sustav snage promjenjive frekvencije [5]

Frekvencija ispitnog napona mora iznositi između 20 Hz i 1 kHz, isto tako, valni oblik impulsnog napona (DAC) je smatran prikladnim za izborna ispitivanja (specijalna ispitivanja) instalirane VN opreme, što znači za izvođenje dijagnostike na instaliranoj VN opremi s ciljem hvatanja karakterističnih vrijednosti (parametara) koji odražavaju stanje izolacije. Norma IEC 60840, koja se bavi VN kabelima, navodi kako navedeni oblik ispitnog napona za ispitivanje nakon polaganja nije dopušten. Isto tako, naveden je u standardu HD 632 S3 isključivo kao oblik alternative ili posljednjeg sredstva prilikom ispitivanja visokonaponskih kabela.

Činjenica je da je metoda problematična kada je riječ o istosmjernoj struji kojom se kablovi pune i posljedično opterećuju izolaciju kod već spomenutog opasnog načina istosmjernog napajanja. Dakle, analogno standardu IEC 60060-3, postoji kontradikcija, budući da su upravo stari kablovi koji su radili na izmjenični napon najviše izloženi fenomenu uhvaćenih naboja. Specifikacije za frekvenciju naponskih impulsa znatno se razlikuju od standarda do standarda. To je navedeno u standardu IEC 60060 između 20 Hz i 1 kHz, dok stopa prigušenja može biti zanemariva za kraće dionice (cca. 1 s) i može premašiti 1 min za duge kabele duljine oko 10 km.

### 5.1.3. Ispitivanje izmjeničnim naponom niske frekvencije (VLF sustavi)

Na VN kabelima u pogonu sustavi se još ne koriste. U slučaju korištenja se koriste uz pretpostavku da se opterećenje izolacije tijekom ispitivanja provodi s nižim naponom nego što bi inače bilo potrebno zbog niske frekvencije. Frekvencija radnog izmjeničnog napona je 500 puta veća od frekvencije VLF napona, što znači da je zbog brže promjene polariteta potpuno drugačiji mehanizam parcijalnih pražnjenja, radi se o nižim vrijednostima probojnog napona. Drugim riječima, pri VLF ispitnom naponu probojna čvrstoća iznosi dvostruko više nego kod izmjeničnog napona frekvencije 50 Hz, stoga je za isti učinak potrebna nekoliko puta ( $2,5-4 \times U_0$ ) veća amplituda ispitnog napona.



Slika 5.8: VLF sustav napajanja s promjenjivom frekvencijom između 0,1 Hz i 0,01 Hz [5]

Legenda slike:

1. Ručka za deelektriziranje
2. 50 m kabelski produžetak
3. PDTD Filter
4. Sklopni kondenzator
5. Mjerni kontakt
6. Pojačalo pozitivnog signala
7. Pojačalo negativnog signala

Suvremeni sustavi koji se proizvode u svijetu dostižu do 200 kV amplitudne vrijednosti ispitnog napona, što znači da je maksimalna efektivna vrijednost 141 kV, što je nedovoljno za VN ispitivanje frekvencije  $\leq 0,1$  Hz. Ispitivanja s VLF na VN naponskoj razini su vrlo rijetka i upitna zbog nedostatka dovoljno visokih napona. Pretpostavlja se da će biti potreban ispitni napon nakon postavljanja od  $3 \times U_0$  kada se koristi sinusoidalni napon i  $4,2 \times U_0$  kada se koristi kosinus kvadratni val [5].

Prije svega, prije svakog mjerenja bit će potrebno provjeriti da li je premašena vrijednost električnog polja na vodiču i izolaciji u smislu ispitnog napona, inače se ispitivanje neće moći provesti, jer električni polje ne smije premašiti 30 kV/cm (IEC 60840 ili za najviše

napone IEC 62067), proizvođač kabela i proizvođač završetka također će morati dati dopuštenje prilikom testiranja nakon instalacije ovom metodom (SC B1 .38, TB Nacrt za ispitivanje kabela nakon instalacije). Rast i dinamika električnih stabala vrlo je nepoznata za naponske razine visokonaponskih i vrlo visokonaponskih kabela, a nepoznata je i ispitna vrijednost za PD induksijski napon (PDIV) za VN kabele. Također je nepoznato trajanje VLF naponskog opterećenja koje pokazuje nedostatke koji bi ugrozili izolaciju i uzrokovali proboj izolacije tamo gdje je izolacija neispravna (baš kao što nema porasta PD-a u rezonantnom testu konstantnog napona, već proboj izolacije) [5].

## 6. ISPITIVANJE VISOKONAPONSKIH KABELA PRIJE PUŠTANJA U POGON

Ispitivanje visokonaponskih kabela se provodi nakon polaganja i spajanja kabela prije puštanja u pogon (slika 6.1).



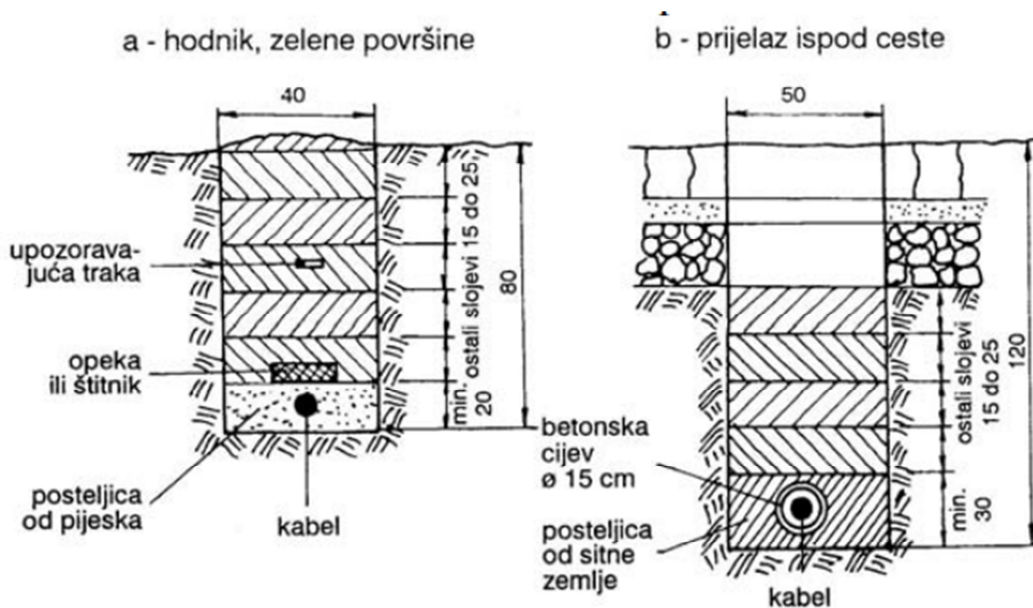
*Slika 6.1: Priprema visokonaponskog kabela za spajanje [2]*

Polaganje kabela je potrebno izvršavati sa velikim oprezom kako bi se izbjeglo moguće oštećenje kabela. Preporučeni postupci polaganja kabela jesu [2]:

- prilikom polaganja kabela temperatura mora biti takva da ne uzrokuje oštećenja kabela niti ugrožava sigurnost ljudi koji izvode polaganje i opreme kojom se koriste,
- razvlačenje kabela je potrebno izvoditi putem uređaja za razvlačenje sa kontrolom vučne sile,
- prilikom polaganja kabela u zemlju, kabel je potrebno polagati na pripremljenu posteljicu, nije preporučljivo vući po zemlji, posebice ukoliko se radi o kamenom tlu,
- materijali od kojih je posteljica napravljena ne smiju biti imati agresivno djelovanje na plašt kabela,
- kabel se ne smije savijati više od minimalno propisanog polumjera savijanja,
- kabelski rov se ne smije zatrpavati sa grubim kamenjem,
- iznad kabela je potrebno postaviti štitnike i vrpca koja upozorava na opasnost,
- krajeve na kabelima je potrebno zatvoriti putem vodonepropusnih kapa.



Polaganje kabela je moguće izvršiti na standardni način izravno u zemlju (zelena površina i prijelaz ispod ceste) kako je prikazano na slici 6.2.



Slika 6.2: Standardni način polaganja kabela izravno u zemlju [6]

Temperatura polaganja kabela sa PVC plaštem iznosi do  $-5^{\circ}\text{C}$ , dok se kabeli sa PE plaštem mogu položiti na temperaturi do  $-20^{\circ}\text{C}$ . Ukoliko se polaganje kabela provodi na temperaturama koje su niže od prethodno navedenih, potrebno je zagrijati kabel na temperaturi iznad  $+5^{\circ}\text{C}$  i održavati temperaturu minimalno 24 sata prije polaganja. Minimalni promjer savijanja kabela tokom polaganja iznosi (6,1):

$$R_s \geq 15 D \quad (6,1)$$

$$R_s \geq 15 D \quad (6,2)$$

D - vanjski promjer kabela.

Što se tiče sile razvlačenja, dopuštena sila prilikom primjene vučne čarapice ne smije prijeći (6,3):

$$P_d \leq 5 D^2 N \quad (6,3)$$

Isto tako, prilikom razvlačenja dopuštena sila prilikom primjene vučne čarapice ne smije prijeći (6.4):

$$\mathbf{Cu: } Pd \leq n \times q \times 50 N \quad (6.4)$$

$$\mathbf{Al: } Pd \leq n \times q \times 50 N$$

U prethodno navedenim formulama sljedeća značenja jesu:

- D – promjer kabela u mm,
- n – broj vodiča u kabelu ili broj kabela,
- q – presjek vodiča u mm<sup>2</sup>

Preporučljivo je razvlačenje kabela pomoću vučne čarapice, s time da je nakon završetka razvlačenja, potrebno odsjeći dio kabela koji je bio obuhvaćen vučnom čarapicom.

Nakon što je kabel položen, mora se ispitati prije nego što se pusti u pogon. Postupak ispitivanja se sastoji od:

- ispitivanja cjelokupne duljine trase kabela s ciljem otkrivanja dielektrične čvrstoće primarne izolacije,
- ispitivanja vanjskog plašta podzemnog kabela i kablenskog pribora s ciljem otkrivanja funkcionalne ispravnosti kabela koji je položen duž cijele trase,
- provjere građevinskih radova i njihove ispravnosti,
- snimanja položaja kabela i trasa,
- izrade dokumentacije o izvedenom stanju,
- provjere izvedenih radova i usporedbe sa dokumentacijom od projekata,
- procesa izrade posljednjeg protokola koji prikazuje ispravnost i dovršenost kompletnog voda kabela.

U ovome radu će fokus biti na 110 kV kablenskom vodu. Ako se kabeli polažu unutar otvorenog kablenskog tunela, nasipanog kablenskog tunela ili kanalizacije, nije moguće izvršiti vizualan pregled. Shodno tome, u nastavku su prikazane metode provjere koje

pokazuju da li je kabel kvalitetno postavljen i da li su kableske stopice i spojnice pravilno izrađene nakon polaganja kabela.

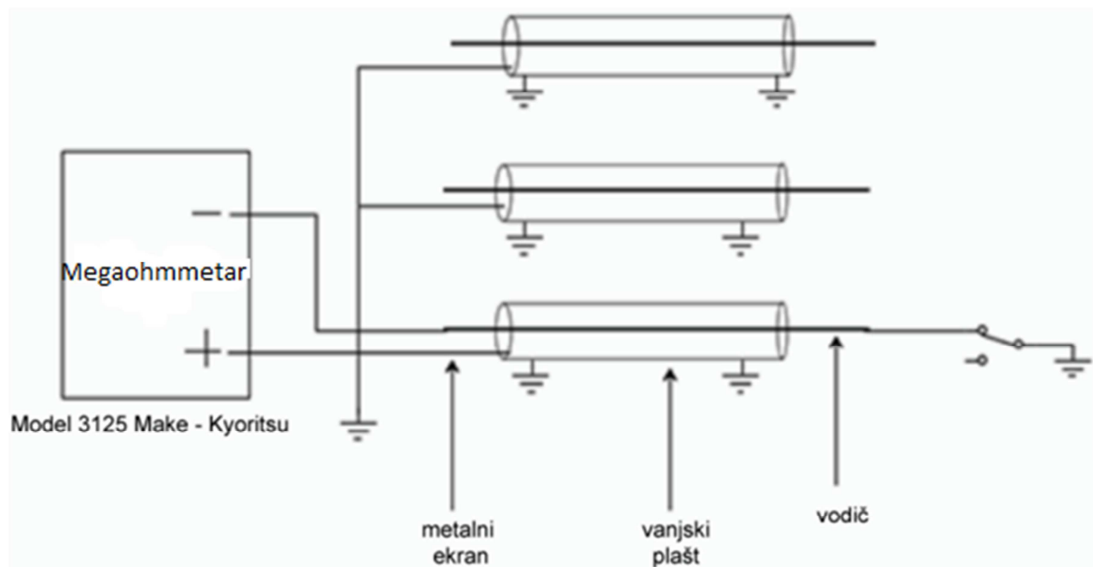
U nastavku rada je prikazano:

- postupak ispitivanja identifikacije faza,
- postupak mjerenja otpora vodiča,
- postupak ispitivanja kapaciteta,
- postupak ispitivanja vanjskog plašta,
- postupak ispitivanja otpora izolacije,
- postupak provjere poprečnog spajanja visokonaponskog kabela,
- postupak ispitivanja impedancije nultog slijeda i impedancija pozitivnog i negativnog slijeda,

### **6.1. Postupak ispitivanja identifikacije faza**

Postupak ispitivanja identifikacije faza se provodi odmah nakon što je instalacija završena, jer se kabeli moraju identificirati sa svojim fazama te je potrebno potvrditi pravilno označavanje faza (slika 6.3). Ispitivanje se sastoji od:

- metalnog ekrana kabela koji mora biti kratko spojen i uzemljen na jednom kraju kabela,
- ispitivanja vodiča kabela koji mora biti spojen na negativni pol koji se nalazi na brojilu a pozitivni pol je uzemljen,
- mjerenja otpora putem prekidača na drugom kraju kabela,
- ukoliko otpor rezultira sa 0, identifikacija faze je smatrana ispravnom,
- provjere ispravnosti kodiranja boja koje se izvodi putem otvaranja prekidača i očitavanja vrlo visokog otpora putem mjerača,
- ponavljanje testa s ciljem otkrivanja ostalih faza.



*Slika 6.3: Shema identifikacije faze [7]*

Prilikom provođenja postupka identifikacije faze je korišten model Kyoritsu 3125A (slika 6.4) koji je smatran upravljačkim i visokonaponskim testerom koji se koristi s ciljem mjerenja otpora izolacije [8].



*Slika 6.4: Kyoritsu 3125A [8]*

## 6.2. Ispitivanje otpora vodiča

Postupak ispitivanja otpora vodiča (slika 6.5) se provodi u skladu sa normom HRN EN 60228:2007 – Vodiči za kabele (IEC 60228:2004; EN 60228:2005). Ispitivanje otpora vodiča se provodi na sobnoj temperaturi od 20°C, a dobivene vrijednosti se izračunavaju putem odgovarajuće formule. Ispitivanje se sastoji od kratkog spajanja vodiča sa vodičem čiji presjek iznosi 95 mm<sup>2</sup>, dok se ostali krajevi kabela povezuju sa mostom i na kraju se zapisuje izmjerena vrijednosti. Nakon čega slijedi formula (6.5):

$$R_{20} = \frac{R}{L} (1 + 0,00393 \cdot (T - 20)) \left[ \frac{\Omega}{KM} \right] \quad (6.5)$$

U prethodno navedenoj formuli sljedeća značenja jesu:

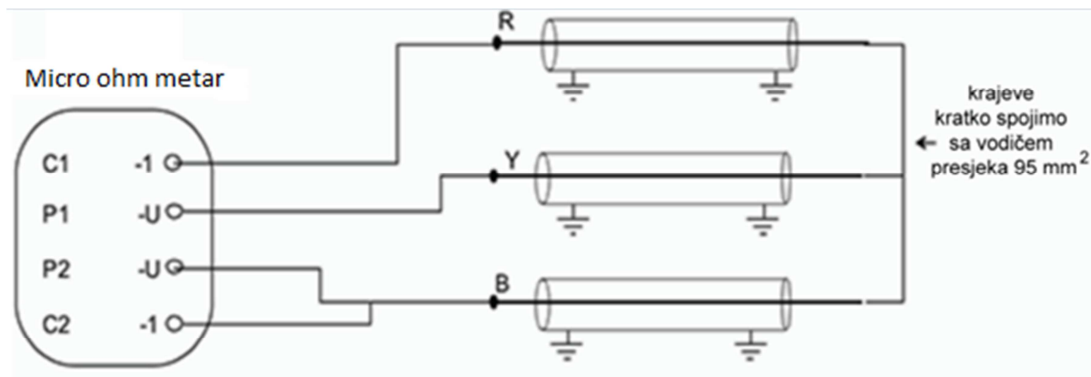
$R_{20}$  – otpor vodiča na 20°C \*  $\left[ \frac{\Omega}{KM} \right]$

R - izmjerena otpornost u jednoj fazi (ohm)

L – točno izmjerena duljina u km

T – točno izmjerena temperatura vodiča u °C

0,00393 – broj koeficijenta temperature na T za bakar

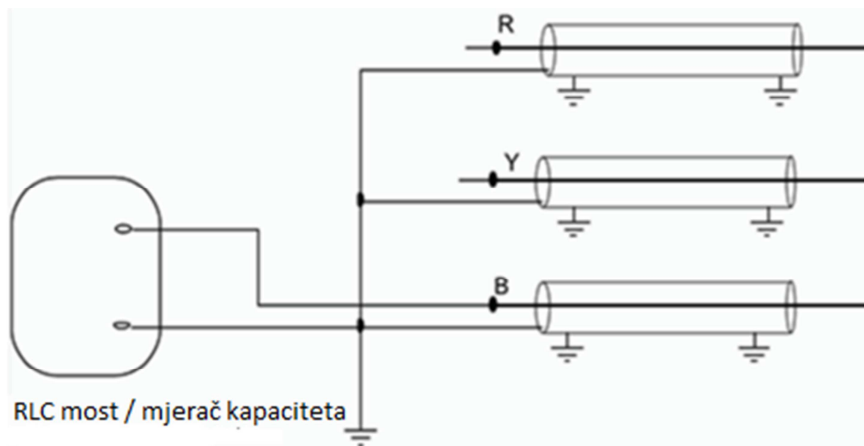


Slika 6.5: Shema mjerenja otpora vodiča [7]

Prilikom provođenja postupka mjerenja otpora vodiča korištena je oprema poput Wheatsonovog mosta, mikro metra i industrijskog termometra za mjerenje temperature okoline.

### 6.3. Ispitivanje kapaciteta kabela

Prije prikazivanja postupka ispitivanja kapaciteta, prvo će biti objašnjen koncept kapaciteta. Kapacitet je smatran svojstvom kabela koji dozvoljava vodiču da održava potencijal preko izolacije. Njegova vrijednost ovisi o izolacijskoj permeabilnosti, izolaciji vodiča i njegovim dimenzijama. Kapacitet kabela predstavlja bitnu informaciju prilikom njegove primjene jer se iz vrijednosti kapaciteta kabela može dobiti kabelska struja punjenja koja je proporcionalna sa kapacitetom, nazivnim naponom i frekvencijom sistema. S obzirom kako je duljina kabela proporcionalna sa strujom punjenja, može se reći kako povećanje duljine kabela utječe na povećanje struje punjenja kabela. Ispitivanje kapaciteta (slika 6.6) se provodi između vodiča i metalnog ekrana u skladu sa normom IEC 60840, s time da izmjerena vrijednost ne smije od normalne vrijednosti biti viša od 8% od one koja je određena od strane proizvođača.



Slika 6.6: Shema postupka ispitivanja kapaciteta [7]

Prilikom provođenja postupka ispitivanja kapaciteta vodiča korištena je oprema poput CPC 100 (slika 6.7) koja se koristi s ciljem ispitivanja kapaciteta do  $0.01 \mu\text{F}$ . Stoga je CPC 100 idealan ispitni set za puštanje u pogon i održavanje trafostanica.



Slika 6.7: CPC 100 [10]

Postupak ispitivanja započinje sa izvođenjem veza kako je prikazano na slici 6.6, nakon čega se spaja kabel instrumenta između metalnog ekrana i vodiča te se izvršavaju ispitivanja. Postupak ispitivanja kapaciteta se provodi između određenog omotača i vodiča prilikom čega se koristi kapacitivni most.

Vrijednost koja je dobivena se pretvara u  $\mu\text{F}/\text{km}$ , a kapacitet se računa sa formulom (6.6):

$$C = \frac{C_m}{L} \left[ \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \right] \quad (6.6)$$

U prethodno navedenoj formuli sljedeća značenja jesu:

$C_m$  – izmjereni kapacitet izražen u  $\mu\text{F}$

$C$  – kapacitet izražen u  $\left[ \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \right]$

$L$  – duljina kabela u km

#### 6.4. Ispitivanje vanjskog plašta kabela

Postupak ispitivanja vanjskog plašta kabela se provodi s ciljem otkrivanja oštećenja u svrhu sprečavanja prodora vlage i nastanka kvarova. Ispitivanje vanjskog plašta kabela se

provodi putem podesivog napona izolacije unutar određenog podesivog vremenskog perioda. Rezultat ispitivanja je smatran uspješnim ako se tokom ispitivanja ne pojavi nikakav poremećaj. Postupak ispitivanja vanjskog plašta naponom se može podijeliti na određene faze:

- u fazi ispitivanja u kojoj se kabel nalazi na kolutu napon iznosi 10 kV a ispitivanje se odrađuje u 10 sekundi,
- u fazi ispitivanja u kojoj je kabel već položen i spojen napon iznosi 10 kV a ispitivanje se odrađuje u 30 sekundi,
- u fazi ispitivanja u kojoj je kabel zatrpan pijeskom napon iznosi 10 kV a ispitivanje se odrađuje u jednom minuti, te je potrebno izdavanje zapisnik koji je potpisan od strane investitora u ulozi svjedoka,
- u fazi ispitivanja u kojoj je kabel spojen te zatrpan, se ispituju spojni dijelovi naponom od 10 kV unutar 30 sekundi,
- posljednja faza ispitivanja se provodi nakon što je završena instalacija kablenskog sustava naponom od 10 kV unutar jedne minute.

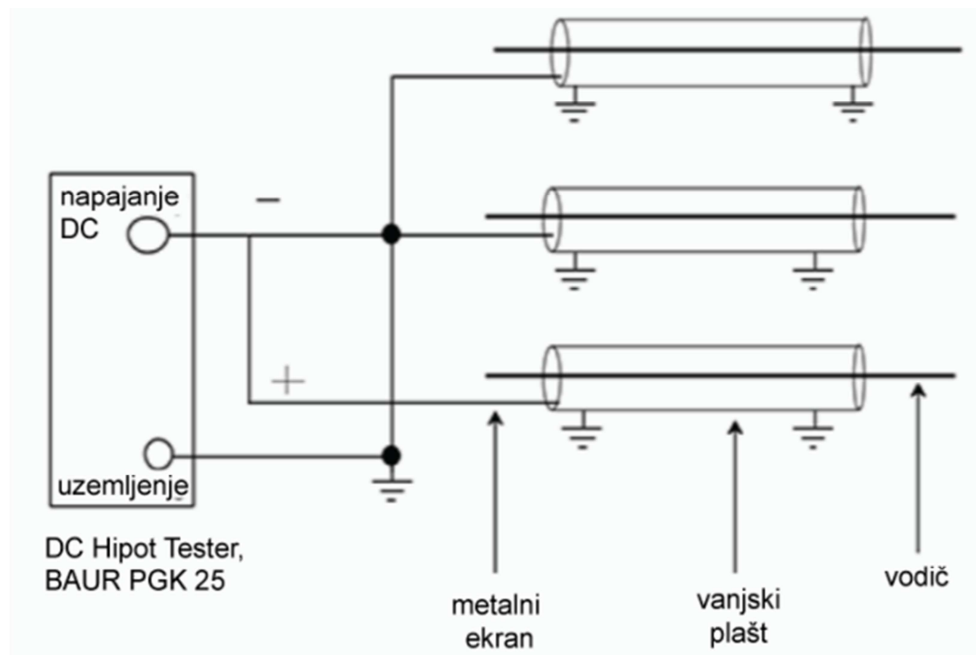
S ciljem provedbe ispitivanja se koristi Baur PGK 25 DC Hipot 25kVDC (slika 6.8) prije puštanja kabela u pogon. Prijenosni uređaj za ispitivanje kabela BAUR PGK 25 koristi se za ispitivanje istosmjernog napona u kabelima niskog i srednjeg napona. Karakterizira ga mala težina od samo 16,5 kg, jednostavno rukovanje i čvrsta konstrukcija za korištenje na licu mjesta [9].



*Slika 6.8: Baur PGK 25 DC Hipot 25kVDC [9]*



Postupak ispitivanja vanjskog plašta (slika 6.9) se provodi tako da se negativna stezaljka od instrumenta spaja na plašt te se uklanja vanjski poluvodljivi sloj koji se nalazi sa obje strane na kabelu. Zatim se pozitivna stezaljka od instrumenta spaja na bakrenu traku na poluvodljivi sloj vanjskog plašta na 60 cm od drugog kraja kabela, te tester 25 kV ima mogućnost korištenja iz izvora karakteristika poput 220/110 V, 50/60 Hz ili putem svojih baterija. Nakon čega slijedi podešavanje vremenskog perioda testa, odabire se razina izlaznog testnog napona od 5 – 25 kV i određuje se raspon mjerenja struje koja je u skladu sa strujnom vrijednosti punjenja kabela koji se testira. Zatim se postupno rotira sklopka koja služi za reguliranje razine izlaznog napona od 1 kV, nakon što punjenje završi, podešava se raspon mjerenja struje na instrumentu i nakon prolaska određenog vremena ispitivanja se smanjuje izlazni napon testera na 0 i ispražnjuje se kabel pomoću spojenog uzemljenja.



Slika 6.9: Shema ispitivanja vanjskog plašta [10]

Ukoliko kabel podnese ispitivanje naponom od 10 kV tokom postupka ispitivanja unutar jedne minute bez prekidanja, kabel je prošao ispitivanje. Isto tako, obavezno je zapisivanje struje curenja tokom postupka ispitivanja i pridržavanje sigurnosnih i zaštitnih propisa.

## 6.5. Ispitivanje otpora izolacije

Otpor izolacije se ispituje putem prijenosnog instrumenta megaohmetra (MEGGER) (slika 6.10) koji pruža očitavanja otpora izolacija u obliku megaohmu [11].



Slika 6.10: Megaohmetar Megger [11]

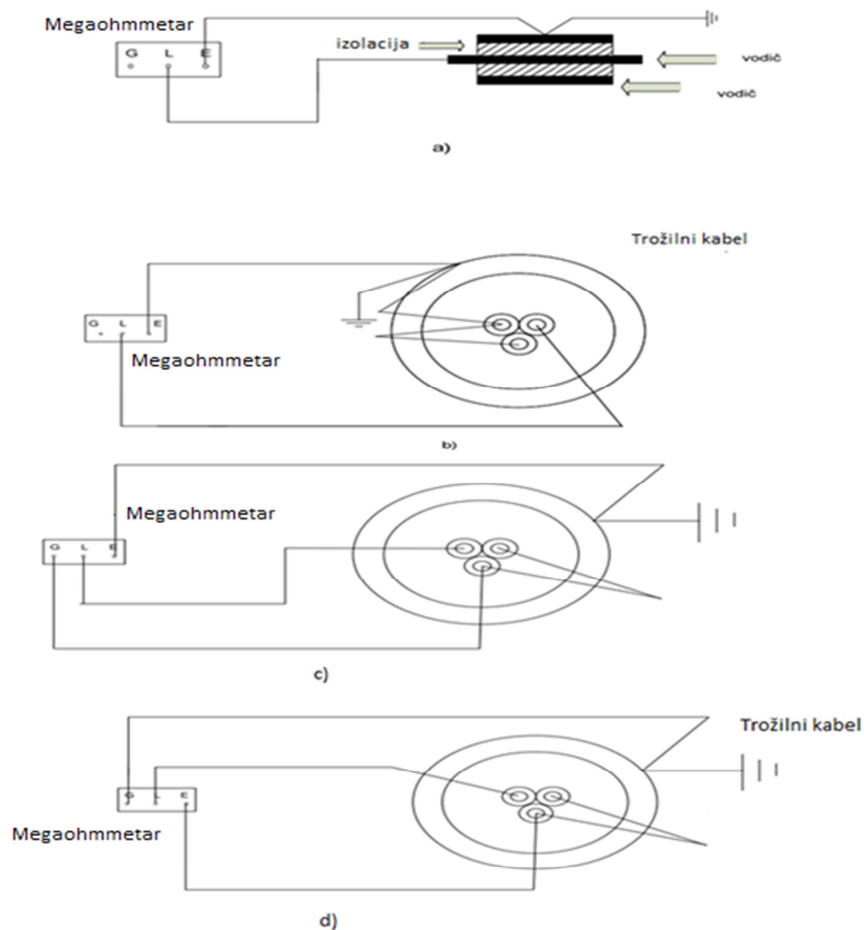
Ovaj oblik predstavlja konstruktivnu metodu prikazivanja stanja izolacije s ciljem provjeravanja onečišćenja koje može uzrokovati vlaga, prljavština ili karbonizacija. Postupak ispitivanja otpora izolacije ne prikazuje ukupnu dielektričnu čvrstoću izolacije kabela ili slabe točke unutar kabela. Tablica 6.1 prikazuje napone koje je moguće koristiti za određene razine napona kabela [12].

Tablica 6.1: Naponi za ispitivanje otpora izolacije kabela [12]

NAPON KABELA (V)	NAPON MEGAOHMETRA (V)
$\leq 300$	500
300 – 600	500 – 1 000
2 400 – 5 000	2 500 – 5 000
5 000 – 15 000	5 000 – 15 000
$> 15 000$	10 000 – 15 000

Postupak ispitivanja otpora izolacije sa megaohmetrom se provodi putem sljedećih koraka (slika 6.11):

- mjerni vodiči sa instrumenta se spajaju na vodič s ciljem provođenja ispitivanja,
- uzemljivanje svih ostalih vodiča na zemlju i plašt vodiča te spajanje na mjerni priključak za uzemljenje,
- paralelno mjerenje ostalih vrijednosti otpora izolacije između određenog vodiča i ostalih vodiča koji su spojeni, nakon toga slijedi između određenog vodiča i zemlje i tako dalje,
- korištenje zaštitnog terminala megaohmetra s ciljem uklanjanja svih efekata površinskih gubitaka na dijelovima na kojima je izolacija izložena na krajevima kabela, te uklanjanja gubitaka prema zemlji.



Slika 6.11: Postupak spajanja kabela za mjerenje otpora izolacije [12]

Slika 6.11 se sastoji od sljedećih dijelova:

- a) jednožilni kabel i jedan vodič prema zemlji,
- b) trožilni kabel, jedan vodič na ostale vodiče, plašt na zemlju,
- c) trožilni kabel, jedan vodič na plašt i na zemlju, ostali zaštićeni,
- d) trožilni kabel, jedan vodič na ostale vodiče, bez gubitaka prema zemlji.

Postupak ispitivanja otpora izolacije se mora provoditi u pravilnim intervalima a dobiveni rezultati se moraju čuvati kako bi se kasnije mogli usporediti. Isto tako, s ciljem valjane usporedbe je potrebno sva očitavanja provoditi na baznoj temperaturi primjerice 15.6°C. Kontinuirani silazni trend predstavlja indikaciju propadanja izolacije bez obzira na to što su izmjerene vrijednosti iznad minimalne granice prihvatljivog ograničenja. Instalacija kabela i vodiča posjeduju široku varijaciju stanja kada je riječ o otporu izolacije, koje nastaju radi raznolikosti vrsta korištenog izolacijskog materijala, debljine izolacije i duljine kruga unutar kojeg se provodi postupak ispitivanja. Spomenuti krugovi su najčešće prošireni na veće udaljenosti, zbog čega mogu biti izloženi velikim razlikama u temperaturi koje mogu uvelike utjecati na dobivene vrijednosti otpora izolacije. U slučaju nedovoljne čistoće, suhoće i zaštite mjernih vodiča kabela i vodiča, može doći do njihovog utjecaja na otpornu vrijednost, zbog čega je od strane The Insulated Cable Engineers Association propisana minimalna vrijednost otpora u svojim specifikacijama namijenjeno raznim vrstama vodiča i kabela. Spomenute minimalne vrijednosti otpora izolacije su namijenjene jednožilnim kabelima nakon ispitivanja izmjeničnom strujom visokog napona koje se temelji na ispitivanju istosmjernom strujom u kojem unutar jedne minute moraju izdržati napon od 500 V na temperaturi koja iznosi 15.5°C ≈ 60°F [12].

Spomenute minimalne vrijednosti namijenjene jednožilnim kabelima se baziraju na formuli (6.7):

$$IR = K \log_{10} \frac{D}{d} \quad (6.7)$$

U prethodno navedenoj formuli sljedeća značenja jesu:

$IR$  – megaohmi po 305 m kabela

$K$  – konstanta za izolacijski materijal

$D$  – vanjski promjer izolacije vodiča

$d$  – promjer vodiča

Tablica 6.2 prikazuje minimalne vrijednosti konstante K za 15.5°C/305 m

Tablica 6.2: Minimalne vrijednosti konstante K za 15.5°C/305 m [12]

TIP IZOLACIJE	MEGAOHMI
Impregnirani papir	2640
Lakirani batist	2640
Smjesa polietena	30 000
Polieten (termoplastika)	50 000
Polivinil klorid 60°C	500
Polivinil klorid 75°C	2 000
Sintetička guma	2 000
EP izolacija	20 000
XLPE	20 000

U sljedećoj tablici 6.3 je prikazan stupanj prirodne i sintetičke gume.

Tablica 6.3: Stupanj prirodne i sintetičke gume [12]

STUPANJ	PRIRODNA GUMA	SINTETIČKA GUMA
Oznaka		950
Izvedba	10 560	2 000
Toplinska otpornost	10 560	2 000
Ozonska otpornost	10 000	2 000
Kerite (smjesa)		4 000

U višezilnom kabelu otpor izolacije jednog vodiča u usporedbi sa svim ostalim vodičima je prikazan formulom (6.7) u kojoj je  $D$  izračunat sljedećom formulom (6.8):

$$D = 2c + 2b \quad (6.8)$$

U prethodno navedenoj formuli sljedeća značenja jesu:

$D$  – promjer izolacije ekvivalentnog jednožilnog kabla

$c$  – debljina izolacije vodiča

$b$  - debljina izolacije omota

IEEE standard 690-1984 i 422-1986 predlažu prihvatljivi otpor izolacije koji je prikazan formulom (6.9):

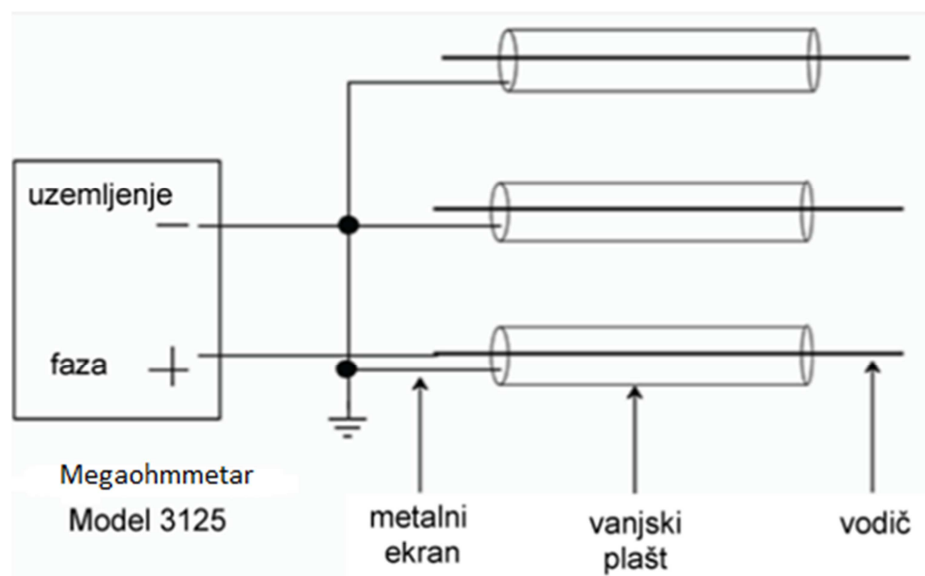
$$IR = 1000 \frac{(kV + 10)}{L} \quad (6.9)$$

U prethodno navedenoj formuli sljedeća značenja jesu:

$L$  – duljina kabela u stopama

$kV$  – razina napona izolacije

Postupak ispitivanja otpora izolacije između metalnog ekrana i vodiča se izvodi kako je prikazano slikom 6.12.



Slika 6.12: Shema postupka ispitivanja otpora izolacije [13]

S ciljem dobivanja rezultata izračuna otpora izolacije po kilometru kabela se koristi formula (6.10):

$$R_l = R_{ja} \dots / L \text{ [G}\Omega/\text{km]} \quad (6.10)$$

U prethodno navedenoj formuli sljedeća značenja jesu:

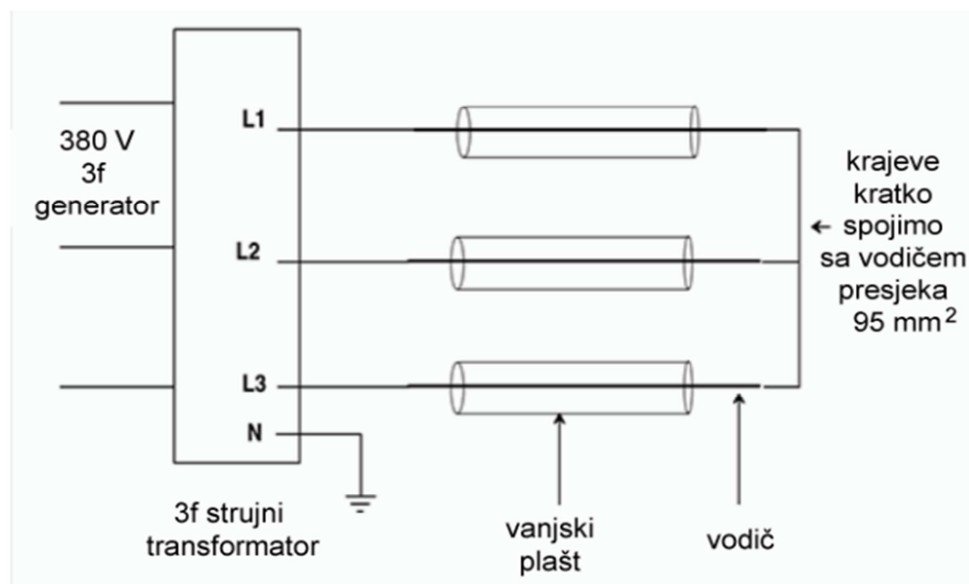
$R_l$  – otpor izolacije u  $[\frac{G\Omega}{km}]$

$R_{ja}$  - izmjereni izolacijski otpor u  $[G\Omega]$

$L$  – duljina kabela u km

### 6.6. Postupak provjere poprečnog spajanja visokonaponskog kabela

Postupkom provjere poprečnog spajanja visokonaponskog kabela (slika 6.13) se provjerava ispravnost spajanja kabela, s time da na metalnom ekranu ne bi trebalo biti struje. Poželjna je situacija u kojoj su svi dijelovi kabela jednake duljine te u kojoj je razmak između kabela kontinuiran sa dužinom kablenske trase. U stvarnom životu ne postoji poželjna situacija jer sama konfiguracija kablenskog sustava nije najpogodnija jer će se uvijek dešavati protok struje indukcije. Stvarni zahtjevi koji su postavljeni na gradilištu određuju stvarne duljine koje se vrlo često razlikuju. Prilikom ovog postupka ispitivanja se koristi oprema poput generatora 380 V, trofaznog strujnog transformatora i mjernih stezaljki.



Slika 6.13: Shema postupka ispitivanja poprečnog spajanja [13]

Postupak ispitivanja poprečnog spajanja započinje sa uzemljenjem metalnog ekrana na oba kraja, kratkog spajanja vodiča sa vodičem čiji presjek iznosi  $95 \text{ mm}^2$  nakon čega se ispituju vodiči koji su povezani na način kako je prikazano slikom 6.13. Zatim se struja postupno povećava putem balansiranja pojedinačnih faza do potrebne vrijednosti te se zapisuje iznos inducirane struje, nakon čega se postupno smanjuje struja i isključuju se prekidači.

### **6.7. Postupak ispitivanja impedancije nultog sustava i impedancija direktnog i inverznog sustava**

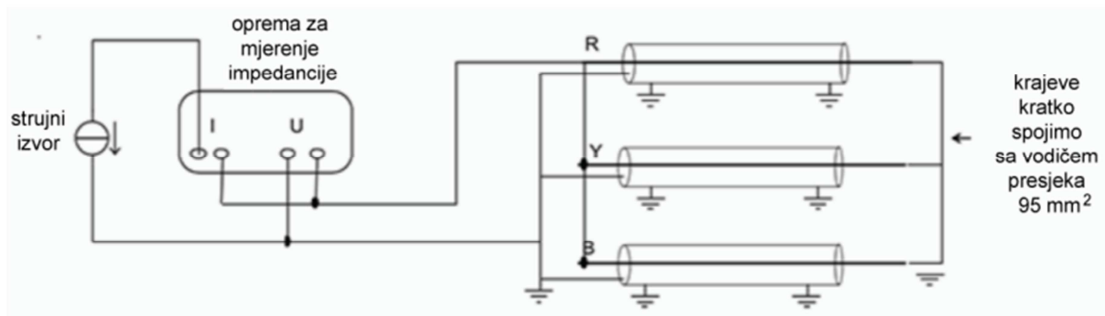
Računanje impedancije direktnog sustava se provodi uz pretpostavku kako se unutar utjecajne udaljenosti ne nalaze metalni elementi (ukopana oprema, cjevovodi, željeznička pruga i tako dalje), jer njihova blizina utječe na impedanciju slijeda. Provođenje ispitivanja impedancije se preporučuje izvoditi u polju nakon što su strujni krugovi instalirani zbog mogućeg utjecaja od ostalih čimbenika. Za kabele, vrijednost impedancije pozitivne i negativne impedancije slijeda je ista.

Električna vodljivost tla i vrsta prijenosa utječe na nultu impedanciju. S ciljem dobivanja točne vrijednosti je potrebno provesti ispitivanje na kabelima koji su već ugrađeni. Početna aproksimacija impedancije nultog slijeda iznosi trostruka vrijednost pozitivne impedancije slijeda. Impedanciji, koja je određena putem petlje koja se sastoji od tri kabela jezgre, se suprotstavljaju tri struje sustava nultog slijeda koje su jednake u magnitudi i smjeru. Otpornost na izmjeničnu struju sustava nultog slijeda podrazumijeva povratni vod uzemljenja i efektivni otpor vodova. Putem mjerenja ili proračuna se određuje impedancija nultog slijeda, koje se provodi onda kada su paralelno povezane sve tri strane sustava.

Oprema koja se koristi prilikom postupka ispitivanja nultog slijeda i impedancije pozitivne sekvence podrazumijeva trofazni varijabilni transformator čiji kapacitet napajanja iznosi do 100 A i digitalnu opremu za ispitivanje impedancije [11].

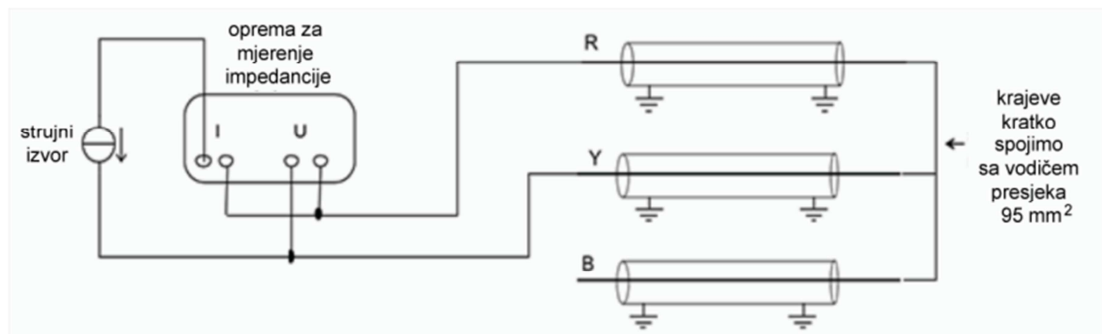
Postupak ispitivanja impedancije nultog slijeda (slika 6.14) se izvodi na temelju sheme spajanja koja je prikazana u nastavku.





Slika 6.14: Shema postupka ispitivanja impedancije nultog slijeda [13]

Postupak ispitivanja impedancije pozitivnog i negativnog slijeda (slika 6.15) započinje nakon kompletnog instaliranja strujnog kruga, te se provodi između dvije faze. Na krajevima kabela mora biti dostupna električna jezgra kabela, dok se povećanje snage postiže sa promjenjivim transformatorom sve dok strujnim krugom ne počne teći struja. Zatim slijedi uključenje opreme koja služi za ispitivanje impedancije, bilježe se iznosi napona, kuta i struje, nakon čega se isključuje oprema za ispitivanje i uključuje se promjenjiv transformator.



Slika 6.15: Shema postupka ispitivanja impedancije pozitivnog i negativnog slijeda [13]

Prethodno opisano ispitivanje se ponavlja 3 puta:

- između faza R i Y,
- između faza R i B,
- između faza Y i B.

## 7. ZAKLJUČAK

Dominantna konstrukcija VN kabela je s izolacijom od umreženog polietilena.

Konstruktivski elementi kabela jesu vodič, poluvodljivi zaslon vodiča, izolacijski materijal, električna ili mehanička zaštita, metalni plašt i vanjski plašt. Prilikom projektiranja, izvođenja radova, uporabe, pogona i održavanja VN kabela potrebno je ispuniti zahtjeve koji su postavljeni putem posebnih propisa koji su u vezi sa područjem prostornog uređenja, proizvodnje, gradnje, distribucije, prijenosa, opskrbe i korištenja električne energije, zaštite na radu te propisa koji propisuju ostale srodne zahtjeve.

Vrste i razine ispitivanja VN kabela su:

- tipska tijekom razvoja i proizvodnje
- ispitivanja tijekom preuzimanja
- ispitivanja prije puštanja u pogon
- dijagnostička ispitivanja kvarova
- dijagnostička ispitivanja utvrđivanja stanja tijekom pogona.

Ispitivanje visokonaponskih kabela se provodi nakon polaganja i spajanja kabela prije puštanja u pogon. Polaganje kabela je potrebno izvršavati sa velikim oprezom kako bi se izbjeglo moguće oštećenje kabela. Nakon što je kabel položen, mora se ispitati prije nego što se pusti u pogon. Prije nego što se započne sa provedbom postupka procedure ispitivanja, ispitni uređaji i oprema obavezno moraju proći vizualne preglede koji obuhvaćaju provjeru serijskog broja uređaja, datuma i godine proizvodnje, vremena od posljednjeg umjeravanja te eventualnih mehaničkih oštećenja.

Vrste ispitivanja VN kabela nakon polaganja i spajanja kabela prije puštanja u pogon:

- postupak ispitivanja identifikacije faza,
- postupak mjerenja otpora vodiča,
- postupak ispitivanja kapaciteta,
- postupak ispitivanja vanjskog plašta,
- postupak ispitivanja otpora izolacije,
- postupak provjere poprečnog spajanja visokonaponskog kabela,
- postupak ispitivanja impedancije nultog slijeda i impedancija pozitivnog i negativnog slijeda,

Postupak ispitivanja identifikacije faza se provodi odmah nakon što je instalacija završena, jer se kabeli moraju identificirati sa svojim fazama te je potrebno potvrditi pravilno označavanje faza. Ispitivanje otpora vodiča se provodi na sobnoj temperaturi od 20°C, a dobivene vrijednosti se izračunavaju putem odgovarajuće formule. Ispitivanje kapaciteta se provodi između vodiča i metalnog ekrana u skladu sa normom IEC 60840, s time da izmjerena vrijednost ne smije od normalne vrijednosti biti viša od 8% od one koja je određena od strane proizvođača. Postupak ispitivanja vanjskog plašta kabela se provodi s ciljem otkrivanja oštećenja u svrhu visokonaponskog kabela se provjerava ispravnost spajanja kabela, s time da na metalnom ekranu ne bi trebalo biti struje. Provođenje ispitivanja impedancije se preporučuje izvoditi u polju nakon što su kabeli položeni. Za kabele, vrijednost impedancije direktnog i inverznog sustava je ista.

## LITERATURA

- [1] Bošnjak, J.: „Kabelski spojni pribor za visokonaponske kabele s ekstrudiranom izolacijom – trenutni status i perspektive razvoja“, Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike i elektroenergetske sustave – CIGRE, Zagreb, 2011.
- [2] Elka: „Visokonaponski kabeli 64/110(123) kV“, s Interneta, [http://elka.hr/wp-content/uploads/2013/06/VN\\_kabeli\\_110kV.pdf](http://elka.hr/wp-content/uploads/2013/06/VN_kabeli_110kV.pdf) 03.10.2022.
- [3] Požar, I.: „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [4] Misita, R.: „Električne mreže, 5. izdanje“, Sarajevo, Igkro „Svjetlost“, 1978.
- [5] Podkoritnik, S., Kobal, I., Janša, M., Zima, N.: „Preizkušanje glavne izolacije visokonapetostnih kablov po polaganju“, Konferenca slovenskih elektroenergetikov – Laško, 2019.
- [6] Polaganje i montaža kabela, s Interneta, <https://www.fpz.unizg.hr/ztos/prsus/polaganje.pdf>
- [7] Crushtymks: „Ispitivanje na naponskom kabelu 110kV nakon instalacije (1)“, s Interneta, <https://crushtymks.com/hr/cables/44-test-on-110kv-power-cable-after-installation-1.html>
- [8] Kyoritsu: „KEW 3125A“, s Interneta, <https://www.kew-ltd.co.jp/en/products/detail/00989/>
- [9] Power Parameters: „Baur PGK 25 DC Hipot 25kVDC“, s Interneta, <https://powerparameters.com.au/product/baur-pgk-25-dc-hipot-25kvdc/>
- [10] Crushtymks: „Ispitivanje na naponskom kabelu 110kV nakon instalacije (2)“, s Interneta, <https://crushtymks.com/hr/cables/15-test-on-110kv-power-cable-after-installation-2.html>
- [11] Alibaba.com: „15 kV Megohmmeter Megger Test Device 15kV Digital Insulation Resistance Tester“ s Interneta, [https://www.alibaba.com/product-detail/15-kV-Megohmmeter-Megger-Test-Device\\_1600082234974.html](https://www.alibaba.com/product-detail/15-kV-Megohmmeter-Megger-Test-Device_1600082234974.html)
- [12] Kuzle, I., Pandžić, H.: „Održavanje elektroenergetskog sustava“, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2012.
- [13] Crushtymks: „Ispitivanje na naponskom kabelu 110kV nakon instalacije (3)“, s Interneta, <https://crushtymks.com/hr/cables/16-test-on-110kv-power-cable-after-installation-3.html>
- [14] Hrvoje Kruljac, „ISPITIVANJE IZOLACIJE VN KABELA PRIJE PUŠTANJA U POGON“, Diplomski rad, Rijeka, 2020

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad se sastoji od sveukupno sedam poglavlja. Prvo poglavlje prikazuje uvod. Drugo poglavlje objašnjava konstrukciju visokonaponskih kabela, s ciljem boljeg razumijevanja same konstrukcije kabela, prvo potpoglavlje objašnjava razvoj dizajna visokonaponskog kabela, nakon čega slijedi drugo potpoglavlje koje prikazuje konstrukcijske elemente kabela, treće potpoglavlje prikazuje osnovnu podjelu odnosno tipove kabela 2XS(F)2Y/A2XS(F)2Y i 2XS(FL)2Y/A2XS(FL)2Y, posljednje potpoglavlje prikazuje strujno opterećenje visokonaponskih kabela. Treće poglavlje prikazuje pogon visokonaponskih kabela. Četvrto poglavlje prikazuje norme, ispitnu opremu za provedbu ispitivanja visokonaponskih kabela koje se dijeli na tri potpoglavlja, prvo potpoglavlje prikazuje norme koje su važne za ispitivanje poput norme IEC 60840 i HRN HD 632, drugo potpoglavlje prikazuje ispitnu opremu, a posljednje potpoglavlje prikazuje metode i vrste ispitivanja poput ispitivanja putem istosmjernog napona, napona vrlo niske frekvencije, izmjeničnog napona i parcijalnih izbijanja. Peto poglavlje prikazuje ispitivanje VN kabela koje objašnjava ispitivanje VN kabela prema vrsti ispitnog sustava. Šesto poglavlje objašnjava ispitivanje visokonaponskih kabela prije puštanja u pogon koje se dijeli na devet potpoglavlja koji pojedinačno pokazuju postupke poput postupka ispitivanja identifikacije faza, ispitivanja otpora vodiča, ispitivanja kapaciteta, ispitivanja vanjskog plašta, ispitivanja otpora izolacije, ispitivanja poprečnog spajanja visokonaponskog kabela, ispitivanja impedancije nultog slijeda i impedancija pozitivnog i negativnog slijeda. Posljednje poglavlje je zaključno poglavlje, nakon čega slijedi popis literature.

**Ključne riječi:** *kabel, ispitivanje, pogon, visoki, napon*

## ABSTRACT

This thesis consists of a total of seven chapters. The first chapter provides an introduction. The second chapter explains the construction of high-voltage cables, with the aim of better understanding the cable construction itself, the first sub-chapter explains the development of the design of the high-voltage cable, followed by the second sub-chapter which shows the structural elements of the cable, the third sub-chapter shows the basic division of cable types 2XS(F)2Y/A2XS(F)2Y and 2XS(FL)2Y/A2XS(FL)2Y, the last subsection shows the current load of high voltage cables. The third chapter presents the operation of high-voltage cables. The fourth chapter shows the standards, test equipment and technical requirements for carrying out the testing of high-voltage cables, which is divided into three sub-chapters, the first sub-chapter shows which shows the standards that are important for testing such as IEC 60840 and HRN HD 632, the second sub-chapter shows the test equipment and the last sub-chapter shows the methods and types of tests such as direct voltage, very low frequency voltage, alternating voltage and partial burst tests. The fifth chapter presents HV cable testing which explains HV cable testing by type of test system. The sixth chapter explains the testing of high-voltage cables before commissioning, which is divided into nine sub-chapters that individually show procedures such as the phase identification test procedure, conductor resistance test, capacity test, outer sheath test, insulation resistance test, high-voltage cable cross-connection test, neutral impedance test sequence and impedance of positive and negative sequence. The last chapter is the concluding chapter, followed by a list of references.

**Key words:** *cable, testing, drive, high, voltage*