

# Ispitivanje kvalitete električne izolacije

---

Španjol, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:414618>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**uniri** DIGITALNA  
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**KARLO ŠPANJOL**

**ISPITIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE IZOLACIJE**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**ISPITIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE IZOLACIJE**  
**TESTING QUALITY OF ELECTRICAL INSULATION**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Ispitivanje brodskih električnih uređaja

Mentor: doc. dr. sc. Miroslav Bistović

Student: Karlo Španjol

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112077804

Rijeka, rujan 2023.

Student: Karlo Španjol

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112077804

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom


ISPITIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE IZOLACIJE

izradio samostalno pod mentorstvom

doc. dr. sc. Miroslava Bistovića

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezoao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



---

Karlo Španjol

Student: Karlo Španjol

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu


JMBAG: 0112077804

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student



---

## SAŽETAK

Električna izolacija je nezamjenjiva komponenta svih modernih elektroenergetskih sustava. Dobro poznavanje i razumijevanje značajki izolacije ali i samog sustava od iznimne je važnosti za siguran i neometan rad sustava, kako kopnenih tako i sustava na brodovima. Zbog značajnog razvoja i zahtjeva za boljom i većom količinom električne energije u svijetu sve više su zastupljeniji visoko naponski sustavi, zbog kojih inženjeri moraju biti u mogućnosti efikasnije rješavati i kontrolirati probleme sa izolacijom i visokim naponima u sustavima. Osnovna ideja ovog rada je opisati što je to električna izolacija i koliko je ona značajna u elektroenergetskim sustavima. Zatim je vrlo važno razumjeti koje vrste izolacijskih materijala postoje, kod kojih sustava ili dijelova sustava se primjenjuju te njihova svojstva. Na samom kraju opisane su metode ispitivanja električne izolacije te načini i zahtjevi koji trebaju biti ispunjeni tijekom ispitivanja, kontrole i nadzora.

Ključne riječi: Elektroenergetski sustav, električna izolacija, energija, ispitivanje, kontrola, nadzor

## SUMMARY

Electrical insulation is an indispensable component of all modern power systems. Good knowledge and understanding of the features of isolation but also of the system itself is extremely important for the safe and unobstructed operation of the system, both onshore and on-board systems. Due to the significant development and demand for quality and better electricity transmission in the world, high-voltage systems are increasingly represented, creating more demanding problems for engineers in terms of efficiently and solving problems with insulation and high voltages in systems. The basic idea of this paper is to describe what electrical insulation is and how significant it is in power systems. Then it is very important to understand what insulation materials exist, which systems or parts of systems are applied and their properties. At the very end there will be described methods of electrical insulation testing and also requirements which need to be met during testing, control and monitoring.

Keywords: control, efficiency, electrical insulation, monitoring, power system, quality, testing

## Sadržaj

<b>SAŽETAK</b> .....	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>III</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA .....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	2
1.4. ZNANSTVENE METODE .....	2
1.5. STRUKTURA RADA.....	2
<b>2. ELEKTRIČNA IZOLACIJA</b> .....	<b>4</b>
2.1. VAŽNOST ELEKTRIČNE IZOLACIJE.....	4
2.2. PODJELA IZOLACIJSKIH MATERIJALA .....	5
2.2.1. <i>Plinovi</i> .....	5
2.2.2. <i>Tekućine</i> .....	6
2.2.3. <i>Vakuum</i> .....	10
2.2.4. <i>Kompoziti</i> .....	10
2.2.5. <i>Krutine</i> .....	11
2.3. ODABIR MATERIJALA ZA ELEKTRIČNU IZOLACIJU .....	13
2.3.1. <i>Električna svojstva</i> .....	13
2.3.2. <i>Termalna svojstva</i> .....	14
2.3.3. <i>Mehanička čvrstoća i izdržljivost</i> .....	14
2.3.4. <i>Utjecaj okoliša</i> .....	14
2.3.5. <i>Kompatibilnost s ostalim materijalima</i> .....	14
2.3.6. <i>Sigurnosni standardi i propisi</i> .....	15
2.3.7. <i>Troškovi</i> .....	15
2.4. DIELEKTRIČNA SVOJSTVA MATERIJALA.....	15
2.4.1. <i>Dielektrična čvrstoća</i> .....	15
2.4.2. <i>Dielektrična konstanta</i> .....	16
2.4.3. <i>Faktor disipacije, kut gubitka i faktor snage</i> .....	18
2.4.4. <i>Polarizacija</i> .....	20
2.5. PRIMJENA IZOLACIJSKIH MATERIJALA.....	21
2.5.1. <i>Izolacija transformatora</i> .....	21
2.5.2. <i>Primjena izolacije prekidača</i> .....	23



2.5.3.	<i>Primjena izolacije rotacijskih strojeva</i>	24
2.5.4.	<i>Izolacija kabela</i>	25
<b>3.</b>	<b>ISPITIVANJE KVALITETE IZOLACIJE</b>	<b>26</b>
3.1.	VRSTE TESTOVA	26
3.1.1.	<i>Testovi prihvatanja</i>	27
3.1.2.	<i>Rutinski testovi održavanja</i>	27
3.1.3.	<i>Specijalni testovi održavanja</i>	28
3.2.	VRSTE ISPITNIH METODA	28
3.2.1.	<i>Ispitivanje čvrste izolacije</i>	28
3.2.2.	<i>Ispitivanje izolacijske tekućine</i>	29
3.2.3.	<i>Ispitivanje prekidača</i>	29
3.3.	ISPITIVANJE IZOLACIJE ROTIRAJUĆIH STROJEVA	29
3.3.1.	<i>Mjerenje faktora disipacije, faktora snage i kapaciteta</i>	30
3.3.2.	<i>Mjerenje djelomičnog pražnjenja</i>	31
3.3.3.	<i>Mjerenje izolacijskog otpora, polarizacijskog indeksa i dielektričnog omjera apsorpcije</i>	33
3.3.4.	<i>Mjerenje istosmjernog otpora</i>	34
3.4.	ISPITIVANJE IZOLACIJE KABELA	35
3.4.1.	<i>Izolacija otpora i DC hi-pot ispitivanje</i>	36
3.4.2.	<i>AC hi-pot ispitivanje</i>	37
3.4.3.	<i>Ispitivanje faktora snage (PF) i faktora disipacije (DF)</i>	37
3.4.4.	<i>Ispitivanja na niskim frekvencijama (VLF)</i>	38
<b>4.</b>	<b>BRODSKI ELEKTROENERGETSKI SUSTAV</b>	<b>39</b>
4.1.	KLASIFIKACIJSKA DRUŠTVA ZA ODREĐIVANJE PRAVILA I STANDARDNA BRODOVIMA	40
4.1.1.	<i>SOLAS konvencija</i>	41
4.2.	SOLAS REGULACIJE ZA ELEKTRIČNE INSTALACIJE	46
<b>5.</b>	<b>NAPREDNE METODE ISPITIVANJA KVALITETE ELEKTRIČNE IZOLACIJE</b>	<b>48</b>
5.1.	TERMOGRAFIJA	48
<b>6.</b>	<b>BUDUĆNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA</b>	<b>51</b>
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b>	<b>53</b>
	LITERATURA	54

<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>55</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>56</b>

# 1. UVOD

Električna izolacija djeluje kao tiha zaštita modernih elektroničkih sustava, sprječava nastanak otvorenog elektroničkog kontakta, osigurava strojeve i ostale infrastrukture. Njezina uloga u očuvanju ljudskih života i integracije elektroničkih komponenti ne može se precijeniti. Da bi se postigla ta ključna uloga, najvažnije je strogo ispitivanje i nadzor kvalitete električne izolacije. Ova praksa ne samo da provjerava kvalitetu i učinak izolacijskih materijala, već također pomaže u prepoznavanju potencijalnih slabosti koje dovode do elektroničkih grešaka ili kvarova u sustavu. U doba koje karakterizira brzi tehnološki napredak i porast zahtjeva za energetsom učinkovitošću i održivošću, važnost ispitivanja kvalitete elektroničke izolacije nikada nije bila više potrebna nego sada. U ovom radu biti će objašnjene vrste ispitivanja, korištene metode i njihova implikacija na sigurnost i pouzdanost elektroničkih sustava u različitim industrijama. Da bi se metode i vrste ispitivanja mogle razumjeti, potrebno je i upoznavanje sa dielektričnim svojstvima materijala koji se koriste za izolaciju ali isto tako i samog sustava u kojem se izolacija primjenjuje što je također dio ovog rada.

## 1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Kako bi elektroenergetski sustav mogao obavljati svoju funkciju, električna izolacija predstavlja ključnu točku održavanja sustava. Pravilno izoliran sustav je pouzdan sustav. Niti jedna izolacija nije savršena pa tako postoje mogućnosti nastanka kvara na izolaciji i samom sustavu. Da bi se izbjegli mogući kvarovi i oštećenja potrebno je obavljati testiranja izolacije kako bi se otkrile moguće greške ili predvidjeli mogući kvarovi sustava. Problem ovog rada je ispitivanje kvalitete električnog sustava, kako na brodu tako i na kopnu i raznim industrijama.

## 1.2. RADNA HIPOTEZA

Ovaj rad napisan je kako bi se bolje razumjela potreba i značaj ispravne električne izolacija u sustavima. Ne opovrgava već dokazane činjenice niti ne dokazuje nove već općenito opisuje svojstva dielektrika, metode i vrste ispitivanja i sustave u kojima se primjenjuju.

### **1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Svrha ovog rada je bolje upoznavanje i razumijevanje materijala izolacije, metoda i vrsta ispitivanja i učinka na sustav i infrastrukturu. Cilj je razumijvanje važnosti električne izolacije za održavanje integriteta i kvalitetnog rada sustava te sigurnosti i zaštiti opreme i ljudskih života.

### **1.4. ZNANSTVENE METODE**

Tijekom pisanja i istraživanja materijala za pisanje ovog rada korištene su navedene metode: metoda analize i sinteze, metode specijalizacije i generalizacije, komparativne metode, metoda klasifikacije i deskripcije.

### **1.5. STRUKTURA RADA**

Ovaj rad podijeljen je u 7 poglavlja koji su redom navedeni: Uvod, Električna izolacija, Ispitivanje kvalitete izolacije, Brodski elektroenergetski sustav, Napredne metode ispitivanja kvalitete električne izolacije, Budućnost elektroenergetskog sustava i Zaključak.

U poglavlju „Uvod“ ukratko je opisan sadržaj ovog rada. Upoznajemo se sa problemom, predmetom i objektom istraživanja, navedena je radna hipoteza, svrha i ciljevi istraživanja te znanstvene metode korištene tijekom pisanja rada.

U poglavlju „Električna izolacija“ objašnjena je važnost električne izolacije, kako na brodovima tako i kopnenim sustavima. Značajno se pristupilo razumijevanju samih materijala koji se koriste za izolaciju, njihovim dielektričnim svojstima i načinu na koji se primjenjuju.

Poglavlje „Ispitivanje kvalitete izolacije“ opisuje vrste testova koji se moraju zadovoljiti te ispitne metode koje se koriste kako bi se navedeni testovi uspješno zadovoljili. U nastavku poglavlja detaljnije je opisana primjena ispitnih metoda kod ispitivanja izolacije rotirajućih strojeva i ispitivanja izolacije kabela.

U poglavlju „Brodski elektroenergetski sustav“ ukratko je objašnjena funkcija kompletnog elektroenergetskog sustava na brodu. Zatim su navedena klasifikacijska društva za određivanje standardna i pravila na brodovima te regulacije za električnu izolaciju prema SOLAS konvenciji.

Poglavlje „Napredne metode ispitivanja električne izolacije“ ukratko navodi mogućnost i način primjene naprednih metoda ispitivanja električne izolacije te opisuje termografiju kao jednu od naprednih metoda.

U poglavlju „Budućnost elektroenergetskog sustava“ dan je osvrt na moguća buduća rješenja u elektroenergetskom sustavu te isto tako na kvalitetnije i bolje načine izoliranja sustava.

U posljednjem poglavlju „Zaključak“ dolazi se do objedinjenja činjenica navedenih tijekom rada i mišljenju o radnoj hipotezi rada.

## 2. ELEKTRIČNA IZOLACIJA

U elektrotehnici, jedna komponenta koja ima kritičnu ulogu je električna izolacija. Često nepredvidljivi dio sustava, zaštitnik koji osigurava nesmetano funkcioniranje različitih električnih sustava i uređaja te koji ima vitalnu ulogu u našem svakodnevnom životu, industrijskim operacijama, i tehnološkom napretku. Električna izolacija je materijal koji ne provodi struju ili tvar koja se odupire protoku električne struje. Koristi se za izoliranje električnih vodiča jedan od drugog i od bilo kojeg drugog vodljivog materijala ili uzemljenih površina. Izolacija također pomaže u sprečavanju električnih udara, kratkih spojeva i drugih opasnosti od električne energije. Izolacijski materijali su bitne komponente bilo kojeg električnog sustava ili uređaja. Oni pokrivaju žice i kablove, razdvajaju vodiče unutar njih i štite ih od međusobnog kontakta i okolnog okoliša. Također se koriste u električnim strojevima i opremi za izoliranje različitih električnih komponenti i sklopova jedan od drugog.

Glavna karakteristika električnog izolatora su njegova otpornost i njegova dielektrična svojstva. Izolatori imaju visoki otpor, što znači da se odupiru protoku električne struje. To je suprotno od provodljivih materijala koji imaju nizak otpor i lako omogućuju protok električne struje. Izbor izolacije ovisi o nekoliko različitih čimbenika, uključujući prirodu električnog sustava ili uređaja, radne uvjete, sigurnosne zahtjeve i troškove. Neki od najpoznatijih izolacijskih materijala su plastika, guma, staklo, keramika i razne smole. Bez električne izolacije ne bismo mogli sigurno i učinkovito koristiti električnu energiju. Električna izolacija ključni je dio modernog života, bilo da se radi o kopnenim sustavima ili elektroenergetskim sustavima na brodu.

### 2.1. VAŽNOST ELEKTRIČNE IZOLACIJE

Električna izolacija je vrlo važan aspekt svakog elektroenergetskog sustava. Ona omogućava sigurnost sustava i mogućnost kvalitetnog obavljanja njegovih sustava. Svrha električne izolacije je spriječiti protok električne struje između vodljivih materijala ili komponenti. Koristi ponajprije neometan rad sustava i kvalitetnu proizvodnju energije, zaštitu opreme i održavanja integriteta električnih sustava. Ovo su neke od glavnih svrha električne izolacije [1]:

1. Zaštita od električnog udara

Jedna od glavnih svrha električne izolacije je zaštita korisnika i operatera od strujnog udara. Strujni udar nastaje kada pojedinac dođe u kontakt s vodičem i njegovo tijelo ili dio tijela postane dio električnog kruga. Izolacija je barijera koja sprječava izravan kontakt s električnim krugovima ili

komponentama. To je osnovna sigurnosna mjera u svim električnim sustavima, od kućanskih aparata do velike industrijske opreme.

## 2. Očuvanje vodljivih materijala

Električna izolacija također igra važnu ulogu u očuvanju vodljivih materijala. Bez odgovarajuće izolacije, vodiči, posebno oni u zahtjevnim ili vanjskim okruženjima, mogu s vremenom korodirati. To može biti posljedica izloženosti vlazi, fluktuaciji temperature ili drugim faktorima okoliša. Izoliranjem takvih vodljivih materijala u zaštitni izolacijski sloj znatno produžuje njihov vijek i osigurava njihovu funkcionalnu cjelovitost.

## 3. Osiguravanje efikasnog rada sustava

Električna izolacija ključna je za učinkovit rad električnih uređaja i sustava. Sprječavanjem kratkih spojeva i održavanjem kvalitetnog protoka struje, izolacija osigurava protok električne energije tamo gdje je to potrebno i na način predviđen dizajnom uređaja ili sustava. To osigurava optimalan rad i pomaže u sprečavanju energetske otpada, jer se električna energija može usmjeriti i učinkovitije koristiti.

## 2.2. PODJELA IZOLACIJSKIH MATERIJALA

Postoji veliki broj izolacijskih materijala koji su pogodni za korištenje i zaštitu sustava. Dobrim poznavanjem svojstava materijala potrebno je odabrati materijal koji najbolje odgovara zahtjevima sustava. Svi materijali mogu ukratko biti svrstani u nekoliko skupina [1]:

- Plinovi
- Tekućine
- Vakuum
- Kompoziti
- Krutine

### 2.2.1. Plinovi

Većina plinova su jako dobri izolatori. U današnje vrijeme često se koriste plinom izolirani kabeli koji su ispunjeni sa sumpornim heksafluridom odnosno  $SF_6$ . Naravno to nije jedini primjer i plin koji se koristi u izolacijske svrhe već se također koriste i drugi plinovi ali i smjese plinova kao što su

$N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$  i zrak. Savršeni plinski izolator trebao bi prije svega biti kemijski i toplinski stabilan, ne smije stvarati toksične nusproizvode prilikom djelovanja električne energije i na kraju također bitna činjenica a to je jeftin. Osim navedenih vrijednosti, najvažnije je da ima visoku dielektričnu čvrstoću i

da ne mijenja svoja svojstva pod istosmjernim, izmjeničnim i impulsnim naponima tijekom dugotrajne uporabe.

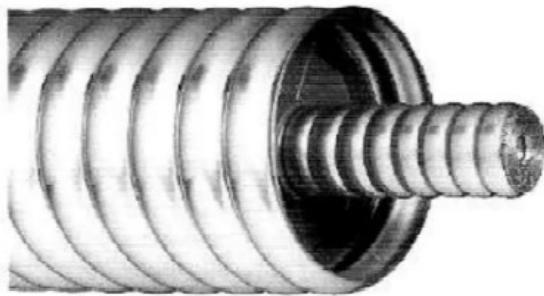
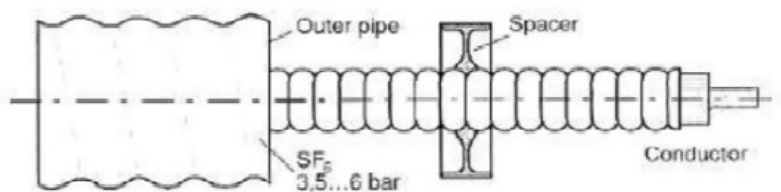


Figure 5.17  
Flexible  $SF_6$ -insulated cable for 220 kV [112]



Slika 1. Plinom izolirani kabel ispunjen sumpornim heksafluridom

Izvor: <https://www.slideshare.net/razuk1/under-ground-cables-presentation>

Plinska izolacija nudi veći dielektrični napon od izolacije zraka i može izdržati velike napone. Uobičajeno je da se koristi u visokonaponskoj opremi kao što su prekidači, transformatori i plinsko izolirana rasklopna postrojenja [2].

### 2.2.2. Tekućine

Tekuća izolacija koristi se u scenarijima u kojima kruta izolacija možda nije praktična ili izvediva. Mineralno ulje i sintetičke tekućine poput silikonskog ulja obično se koriste kao tekući izolatori. Tekuća izolacija pruža učinkovitu električnu izolaciju i rashladno je sredstvo u primjenama poput transformatora i kondenzatora. Potrebno je znati da idealni tekući izolator ne postoji, odnosno nije



dostupna ni jedna tekućina koja posjeduje sva svojstva kao što su visoka vrijednost dielektrične čvrstoće, toplinska vodljivost, otpornost na volumen te također niski faktor gubitka. Uz sva ta svojstva tekućina mora biti nezapaljiva, netoksična i kemijski stabilna. Dakle pošto ni jedna tekućina nema sva potrebna svojstva i nije idealna često se koriste mješavine različitih tekućina. Način korištenja je vrlo sličan plinskim izolatorima, tekućina ispunjava prostore oko vodiča i učinkovito ih izolira. Također pomaže u raspršivanju topline koju stvaraju električne komponente. Tekuća izolacija posebno je korisna u visokonaponskim aplikacijama koje nude poboljšana dielektrična svojstva i učinkovito rasipanje topline. Mora se paziti da se spriječi curenje i osigura kompatibilnost s posebnim zahtjevima za primjenu. Izolacijska tekućina može se naći u mnogim različitim vrstama uređaja, uključujući transformatore, prekidače i sklopke [2].

### 2.2.2.1. Tehnička svojstva izolacijskih tekućina

Prije svega važno je razumjeti specifičnosti svake tekućine te kako se one uspoređuju. Svaka izolacijska tekućina ima različita svojstva zbog čega je potrebno pažljivo odabrati najbolje rješenje za zadani problem. Jedne od glavnih čimbenika prilikom odabira su dielektrična čvrstoća, opasnost od požara i utjecaj na okoliš. Neka od tehničkih svojstava koje je važno razumjeti prilikom odabira su sljedeća [3]:

- Dielektrična čvrstoća

Maksimalna čvrstoća električnog polja koju tekućina može prirodno izdržati bez propadanja i postati električno provodljiva. Ovo je glavno svojstvo koje određuje njegovu održivost kao izolacijska tekućina. Veća dielektrična čvrstoća znači da ima veći otpor na električne naboje [4].

<i>Liquid</i>	<i>Strength (MV/cm)</i>
Benzene	1.1
Goodoil	1.0–4.0
Hexane	1.1–1.3
Nitrogen	1.6–1.88
Oxygen	2.4
Silicon	1.0–1.2

Slika 2. Dielektrična čvrstoća nekih tekućina

Izvor: [https://www.brainkart.com/article/Breakdown-in-Liquid-Dielectrics\\_12890/](https://www.brainkart.com/article/Breakdown-in-Liquid-Dielectrics_12890/)

- Faktor snage

Također se naziva i faktor disipacije, ovo svojstvo pokazuje koliko se energije raspršuje kroz tekućinu kao toplina. Faktor snage mjeri koliko je učinkovita izolacijska tekućina i može biti velika indikacija kontaminacije i propadanja. Niži faktor snage znači njegov bolji izolator.

- Gustoća

Gustoća tekućine opisuje njezin unutarnji otpor protoku, što se može smatrati mjerom trenja tekućine. Voda ima nisku viskoznost zbog čega brzo teče, dok recimo med ima veću viskoznost zbog čega polako teče. Tekućina s nižim viskozitetom omogućava bolji protok i prijenos topline kroz rashladni sustav.

- Točka izlivanja

Označava najnižu temperaturu na kojoj će izolacijska tekućina teći. Ova je vrijednost važna u hladnim klimama kako bi se osiguralo da će ulje cirkulirati i služiti svojoj svrsi kao izolacijski i rashladni medij.

- Biorazgradivost

Opisuje sposobnost izolacijske tekućine da propada djelovanjem živih organizama. Ovo je izravan pokazatelj koliko je tekućina štetna za okoliš.

- Specifična gravitacija

Omjer gustoće tekućine i gustoće vode. Budući da voda ima specifičnu težinu od 1,0, slobodna voda u izolacijskoj tekućini migrirat će se na vrh ili dno, ovisno o specifičnoj težini izolacijske tekućine. Dielektrični raspad većine izolacijske tekućine obrnuto je povezan s sadržajem vode, što znači da se dielektrična čvrstoća tekućine smanjuje kako se njezin sadržaj vode povećava [3].

S.No.	Property	Transformer Oil	Capacitor Oil	Cable Oil	Silicone Oil
1.	Relative permittivity 50 Hz	2.2 – 2.3	2.1	2.3 – 2.6	2.7 – 3.0
2.	Breakdown strength at 20°C 2.5 mm 1 min	12 kV/mm	18 kV/mm	25 kV/mm	35 kV/mm
3.	(a) Tan δ 50 Hz	10 <sup>-3</sup>	2.5 × 10 <sup>-4</sup>	2 × 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>
	(b) 1 kHz	5 × 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
4.	Resistivity ohm-cm	10 <sup>12</sup> – 10 <sup>13</sup>	10 <sup>13</sup> – 10 <sup>14</sup>	10 <sup>12</sup> – 10 <sup>13</sup>	2.5 × 10 <sup>14</sup>
5.	Maximum permissible water content (ppm)	50	50	50	< 40
6.	Acid value mg/gm of KOH	NIL	NIL	NIL	NIL
7.	Saponification mg of KOH/gm of oil	0.01	0.01	0.01	< 0.01

Slika 3. Dielektrična svojstva tekućina

Izvor: [https://www.brainkart.com/article/Breakdown-in-Liquid-Dielectrics\\_12890/](https://www.brainkart.com/article/Breakdown-in-Liquid-Dielectrics_12890/)

### **2.2.2.2. Glavne vrste tekućih izolatora**

Jedne od najčešćih vrsta izolacijske tekućine koje se koriste na današnjem tržištu su mineralna ulja, silikoni, ugljikovodici i prirodni esteri. Svaka od ovih tekućina ima svoja jedinstvena fizička i izolacijska svojstva koja određuju njihovu upotrebu [3].

#### **1. Mineralna ulja**

Mineralno ulje je vjerojatno najstarija i najčešće korištena dielektrična tekućina s kojom se možemo susresti. Ova vrsta tekućine je najbolji izbor za vanjske transformatore zbog dugogodišnje evidencije dielektrične čvrstoće i toplinskih svojstava. Glavni nedostatak mineralnog ulja je taj što se smatra zapaljivom tekućinom s niskom biorazgradivošću, koja ograničava njegovu upotrebu i zadržavanje.

#### **2. Silikon**

Silikon je izolacijska tekućina koja je manje zapaljiva tekućina odnosno ima visoku točku zapaljenja, što ga čini idealnim za upotrebu u zatvorenim područjima. Silikon ima i nedostatke, poput kemijskih nusproizvoda i visokih troškova povezanih s njegovom uporabom. U usporedbi s mineralnim uljem, ima sličnu dielektričnu čvrstoću i veću specifičnu težinu, ali nije biorazgradiv.

#### **3. Ugljikovodik**

Tekućine koje sadrže visoko rafinirana naftna ulja imaju svojstva otporna na vatru koja ih čine idealnim izborom za upotrebu tamo gdje je potrebna manje zapaljiva tekućina. Ove tekućine imaju izvrsne izolacijske i rashladne kvalitete, ali imaju nižu točku zapaljenja u odnosu na silikon i također su skuplje od mineralnog ulja. Ugljikovodična tekućina ima specifičan faktor gravitacije i snage sličan faktoru mineralnog ulja te je također biorazgradiv.

#### **4. Prirodni ester**

Prirodna esterska tekućina je najbolji izbor kod zaštite okoliša jer se dobiva iz netoksičnih prirodnih ulja (poput soje) i potpuno je biorazgradiva. Oni se samo-raspršuju što ih čini idealnim za unutarnje instalacije i mogu apsorbirati vlagu bolje od ostalih tekućina. Prirodni esteri imaju i najveću dielektričnu čvrstoću u usporedbi s ostalim tipovima tekućine. Glavni nedostatak prirodnih estera su veći trošak i viši faktor snage što može dovesti do viših radnih temperatura [3].

### 2.2.3. Vakuum

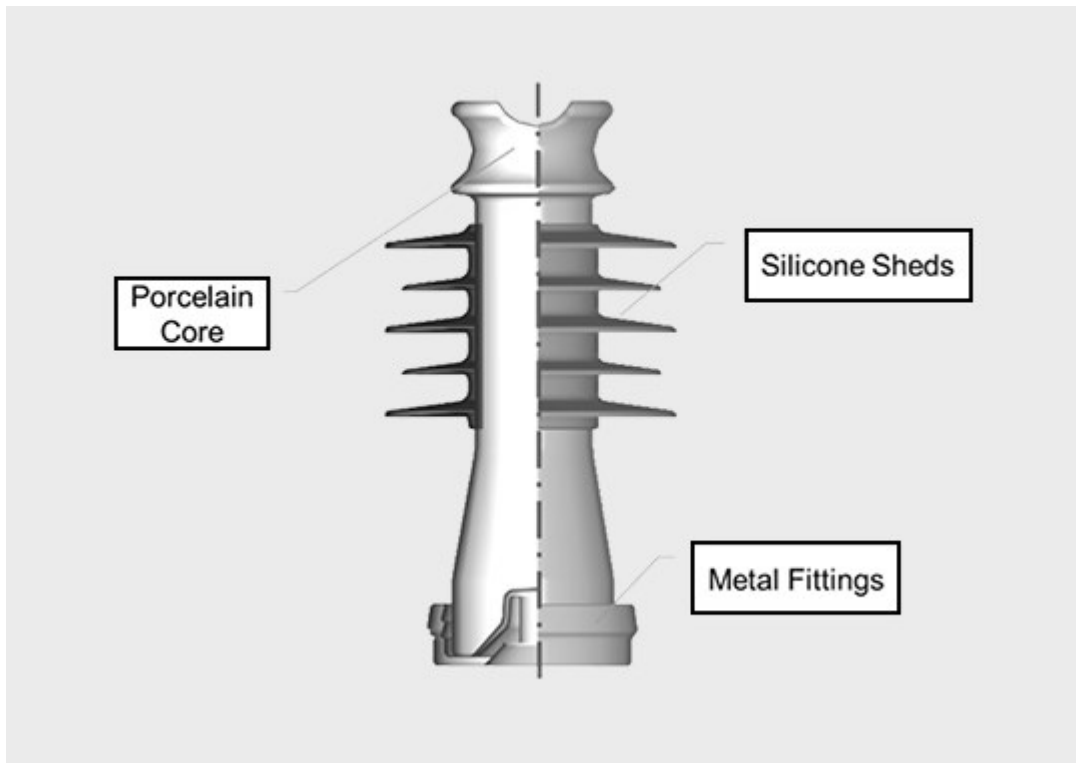
Vakuum je medij koji ima izvrsna izolacijska svojstva, ali idealni vakuum je vrlo teško postići. Prema Townsend teoriji, porast struje ovisi o strujanju nabijenih čestica. U nedostatku takvih čestica, kao u slučaju savršenog vakuuma, ne bi trebalo biti provođenja, a vakuum bi trebao biti savršen izolacijski medij. Međutim, u praksi prisutnost metalnih elektroda i izolacijskih površina unutar vakuuma komplicira problem i zbog toga će dovoljno visoki napon uzrokovati kvar čak i u vakuumu. U vakuumskom sustavu tlak se održava na vrijednosti znatno nižoj od atmosferskog tlaka. U vakuumskim sustavima tlak se uvijek mjeri u milimetrima žive, gdje je jedna standardna atmosfera jednaka 760 milimetara žive na temperaturi od 0 ° C. Izraz “ milimetara žive ” standardiziran je kao “ Torr ” od strane Međunarodnog vakuumskog društva, gdje se jedan milimetar žive uzima kao jedan Torr. Za potrebe električne izolacije, raspon vakuuma koji se obično koristi je visoki vakuum, u rasponu tlaka od  $10^{-3}$  Torr do  $10^{-6}$  Torr [5]. Najčešće se koriste izolirani prekidači srednjeg napona i prekidači [6]

Tablica1. Vrijednosti vakuma

<b>VISOKI VAKUUM</b>	$1 \times 10^{-3}$ do $1 \times 10^{-6}$ Torr
<b>VRLO VISOKI VAKUUM</b>	$1 \times 10^{-6}$ do $1 \times 10^{-8}$ Torr
<b>ULTRA VISOKI VAKUUM</b>	$1 \times 10^{-9}$ Torr i ispod

### 2.2.4. Kompoziti

Svaki sustav ili uređaj zahtijeva drugačiji medij izolacije a kod nekih se koriste i kombinirane vrste izolacijskih materijala, što rezultira kompozitnim ili hibridnim tipom izolacije. Primjeri takvih sustava su izolatori dalekovoda koji koriste izolaciju krute tvari i plina. Sučelje sa hibridom krutog i plinskog medija predstavlja najslabiju vezu i mora biti pažljivo dizajniran. Slično tome, u vakuumski izoliranim sustavima, sučelje kombinacija krutine i vakuuma pokazuje se također kao slaba karika. Primjeri krutih / tekućih kompozitnih izolacija su papirne vrpce impregnirane uljem koje se koriste u visokonaponskim kablovima, transformatorima, kondenzatorima i spojnicama. Kod korištenja kompozita od iznimne je važnosti da se osigura kemijska stabilnost obje komponente kompozita i da ne reagiraju međusobno pod kombiniranim toplinskim, mehaničkim i električnim naponima tijekom očekivanog životnog vijeka opreme te bi isto tako njihove dielektrične konstante trebale biti jednake. Kod tekućeg izolatora važno je da ne apsorbira nečistoće iz krute tvari jer one negativno utječu na otpor izolacije, faktor gubitka i dielektričnu čvrstoću [7].



Slika 4. Hibridni izolator za distribucijske stanice

Izvor: <https://www.inmr.com/hybrid-insulators-for-distribution-lines/>

### 2.2.5. Krutine

Idealni kruti izolator uz odlična mehanička svojstva također mora imati i neke od svojstava tekućih i plinskih izolatora. Kruta izolacija je najčešće korištena vrsta električne izolacije i dolazi u različitim oblicima, uključujući prirodne organske tvari poput papira, tkanine, gume itd. ili neorganski materijali poput mlice, stakla ili sintetičkih materijala poput plastike. Kruti izolatori dakle mogu biti sljedeći [8]:

- Papir
- Vlaknasti materijali (neimpregnirani i impregnirani)
- Impregnirani premazi, materijali za punjenje i lijepljenje
- Smole (polimeri)
- Prirodne i sintetičke gume
- Anorganski izolacijski materijali kao što su staklo, keramika, mica i azbest
- Kompoziti

### **2.2.5.1. Papir**

Papir se proizvodi organskim, sintetičkim vlaknima i anorganskim vlaknima (staklo, azbest). Za proizvodnju papira za uporabu kao izolanta potrebna su celulozna vlakna visokog stupnja kemijske čistoće i koja imaju visoku mehaničku čvrstoću. Celuloza je visoko molekularna tvar s formulom  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , gdje je  $n$  vrlo velik broj. Za proizvodnju papira kao izolacijskog materijala, drvena vlakna čine glavni sastojak. Općenito, koriste se meka drvena vlakna. Papir i karton izrađeni od alkalne celuloze mehanički su jači i više je otporan, što je izuzetno važno u inženjerskim primjenama. Papir je nešto štoosim drva može biti napravljeno i od, na primjer, krpe, pamuka, posteljina i razne vrste konoplje. Papir je higroskopan, suši se i impregnira impregnantima. Uobičajeni impregnanti su mineralno ulje i biljna ulja [8].

### **2.2.5.2. Vlaknasti materijali**

Neka od važnih vlakana koja su danas dostupna uključuju pamuk, svilu, vunu, jutu, acetat, najlon, teflon, staklo od vlakana i mnoga druga. Prednosti ovih materijala su velika mehanička čvrstoća, fleksibilnost, jeftini su i jednostavno se obrađuju. Nedostaci uključuju higroskopičnost i nisku električnu čvrstoću. Svojstva ovih materijala mogu se poboljšati impregnacijom. Vulkanizirani papir od vlakana obrađen cinkovim kloridom koristi se za podmetače, podloške i niskonaponsku izolaciju [8].

### **2.2.5.3. Smole (Polimeri)**

Smole su organske tvari s vrlo visokom molekularnom težinom. Dostupne su u prirodi ali mogu biti i umjetno izrađene. Za električnu izolacijsku svrhu, prirodne smole ovih su dana zamijenjene sintetičkim smolama. Sintetičke smole su zapravo sintetički polimeri koji se ponekad nazivaju plastikom i čine važnu skupinu izolacijskih materijala. Smole se mogu klasificirati na temelju njihovog ponašanja pod utjecajem topline, kao termoplastične smole i termoreaktivne smole. Različite vrste smola su sljedeće [8]:

- Prirodne smole
- Polietileni
- Polistiren
- PVC

- Akrilni ostaci (Polimetil metakrilat)
- Teflon
- Poliamidne smole (Najloni)
- Smole dobivene iz celuloze
- Smole od poliestera
- Epoksi
- Silikoni

#### ***2.2.5.4. Anorganski izolacijski materijali***

Anorganski izolacijski materijali koriste se kada primjena zahtijeva fizičku i dielektričnu stabilnost na višim temperaturama gdje organska izolacija ne radi. Oni mogu izdržati vrlo teške i zahtjevne uvjete. Važni anorganski izolacijski materijali su staklo, keramika, mica, azbest i razni metalni oksidi i njihova kombinacija [8].

### **2.3. ODABIR MATERIJALA ZA ELEKTRIČNU IZOLACIJU**

Odabir električnih izolacijskih materijala uključuje razmatranje nekoliko čimbenika kako bi se osigurala optimalna učinkovitost i sigurnost. Evo nekoliko ključnih aspekata koje treba uzeti u obzir pri odabiru izolacijskih materijala:

1. Električna svojstva
2. Termalna svojstva
3. Mehanička čvrstoća i izdržljivost
4. Utjecaj okoliša
5. Kompatibilnost sa ostalim materijalima
6. Sigurnosni standardi i propisi
7. Troškovi

#### **2.3.1. Električna svojstva**

Izolacijski materijali moraju imati odgovarajuća električna svojstva za specifičnu primjenu. To uključuje visoku dielektričnu čvrstoću da izdrži razinu napona bez prekida ili električnog lučenja.

Materijal bi trebao imati nisku električnu vodljivost kako bi se spriječile struje istjecanja i neželjeni gubici energije.

### **2.3.2. Termalna svojstva**

Ključna sposobnost izolacijskih materijala je da izdrže temperaturne razlike. Oni bi trebali imati dobru toplinsku otpornost i stabilnost za održavanje svojih izolacijskih svojstava u širokom temperaturnom rasponu. Neke primjene mogu zahtijevati izolacijske materijale s visokom temperaturnom otpornošću kako bi se izbjegla razgradnja ili taljenje.

### **2.3.3. Mehanička čvrstoća i izdržljivost**

Izolacijski materijali trebaju imati odgovarajuću mehaničku čvrstoću da izdrže napone, vibracije i mehaničke udare koji nastaju u sustavu. Oni bi trebali biti izdržljivi i otporni na fizička oštećenja, poput abrazije, proboja ili kidanja. Mehanička svojstva poput fleksibilnosti ili krutosti trebaju se uskladiti s posebnim zahtjevima sustava ili opreme.

### **2.3.4. Utjecaj okoliša**

Čimbenici okoliša poput vlage, kemikalija i izloženosti UV-u mogu utjecati na izolacijska svojstva materijala. Izolacijski materijali trebaju se oduprijeti uvjetima okoliša kojima će biti izloženi. Na primjer, izolacija otporna na vlagu može biti potrebna u vanjskim ili vlažnim okruženjima i mora izdržati takvu sredinu. Za primjene izložene korozivnim tvarima može biti potrebna kemijska izolacija.

### **2.3.5. Kompatibilnost s ostalim materijalima**

Izolacijski materijali trebaju biti kompatibilni s ostalim komponentama i materijalima unutar sustava. To uključuje razmatranja metoda spajanja i tehnika brtvljenja. Kompatibilnost je ključna za osiguravanje integriteta i dugovječnosti izolacijskog sustava.



### **2.3.6. Sigurnosni standardi i propisi**

Pri odabiru izolacijskih materijala bitno je poštivanje odgovarajućih sigurnosnih standarda i propisa. Odabrani materijali trebaju udovoljavati ili premašiti tražene sigurnosne standarde za primjenu, osiguravajući zaštitu pojedinaca i sustava.

### **2.3.7. Troškovi**

Trošak izolacijskih materijala također je značajan faktor. Iako je odabir visokokvalitetnih materijala koji udovoljavaju zahtjevima važan, podjednako je važno uzeti u obzir ekonomičnost i cjelokupni proračun projekta.

## **2.4. DIELEKTRIČNA SVOJSTVA MATERIJALA**

Dielektrična svojstva izolacije uključuju napon prekida ili dielektričnu čvrstoću, dielektrične parametre poput permitivnosti, vodljivosti, kuta gubitka i faktora snage. Ostala svojstva uključuju električne, toplinske, mehaničke i kemijske parametre. Neki od glavnih dielektričnih svojstava su definirana u nastavku.

### **2.4.1. Dielektrična čvrstoća**

Dielektrična čvrstoća je svojstvo materijala koji ima primarnu funkciju kao električni izolator. Jednostavno rečeno, dielektrična čvrstoća je sposobnost izolacijskog materijala da izdrži primijenjeni električni napon. Definiira se kao najveća snaga električnog polja koju materijal može izdržati bez mogućnosti kvara njegovih izolacijskih svojstava. Dielektrični materijal ima samo neke elektrone u normalnom radnom stanju. Kada se električna čvrstoća poveća iznad određene vrijednosti, to rezultira raspadom. Odnosno, izolacijska svojstva su oštećena i konačno materijal postaje vodljiv. Snaga električnog polja u trenutku kvara naziva se napon raspada ili dielektrična čvrstoća. Može se izraziti minimalnim električnim naponom koji će rezultirati raspadom materijala pod nekim uvjetima. Sljedeća formula opisuje dielektričnu čvrstoću [9]:

$$\frac{V}{t} \quad \text{kV/mm ili V/m}$$

V – Potencijal raspada

t – Debljina dielektričnog materijala

Dielectric Strength of Insulating Materials		
Material	Dielectric Strength	
	( $10^6$ V/m)	(V/mil)
Mica (muscovite)	39.4	1000
Glass	35.5	900
Mica (phlogopite)	31.5	800
Porcelain (electrical)	31.5	800
Steatite	29.6	750
Rubber, hard	27.6	700
Rubber, silicone	23.6	600
Polystyrene	23.6	600
Pyroxylin	23.6	600
Rubber, buna	20.3	515
PTFE	19.7	500
Vinylidene chloride	19.7	500
Fish paper	19.7	500
Methyl methacrylate	18.9	480
Cellulose acetate	15.8	400
Casein plastic	15.8	400
Shellac	15.8	400
Varnished cambric	15.8	400
Alumina	13.4	

Slika 5. Vrijednosti dielektrične čvrstoće nekih materijala

Izvor: [https://www.engineeringtoolbox.com/dielectric-strength-electrical-insulator-d\\_2185.html](https://www.engineeringtoolbox.com/dielectric-strength-electrical-insulator-d_2185.html)

#### 2.4.2. Dielektrična konstanta

Dielektrična konstanta materijala označena je grčkim slovom  $\kappa$  (kappa) a definira se kao:

- Omjer kapacitivnosti materijala i vakuuma,  $C / C_0$
- Omjer propusnosti materijala i vakuuma,  $\epsilon / \epsilon_0$

Dielektrična konstanta naziva se i relativna permitivnost ( $\epsilon_r$ ). To je zato što se mjeri relativno od permitivnosti slobodnog prostora ( $\epsilon_0$ ).

Dielektrična konstanta je bezdimenzionalna mjera. Formula za izračunavanje dielektrične konstante je [10]:

$$\kappa \text{ ili } \epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$C_0 = \epsilon_0 \times A/T$$

Gdje su:

- $\kappa$  ili  $\epsilon_r$  - dielektrična konstanta materijala
- C - kapacitivnost koristeći materijal kao dielektrični kondenzator
- $C_0$  - kapacitivnost koristeći vakuum kao dielektrik
- $\epsilon$  - permitivnost tvari
- $\epsilon_0$  – permitivnost slobodnog prostora
- A - područje ploče / uzorka presjeka
- T – debljina uzorka

Tipične vrijednosti dielektrične konstante za neke materijale su prikazane u nastavku, slika 6.

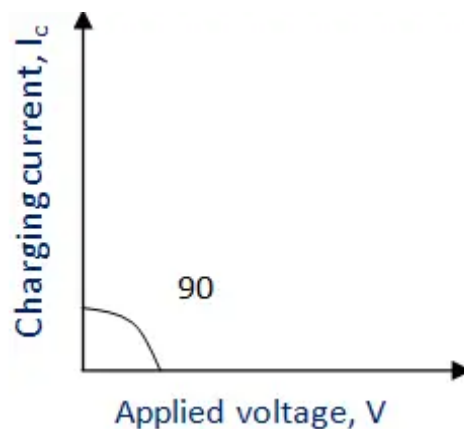
Material	Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ or $\kappa$ )
Vacuum	1.000
Dry air	1.0059
Foam polyethylene	1.6
<a href="#">Fluoropolymers</a>	2.0
<a href="#">Polypropylene</a>	2.1
<a href="#">Butyl rubber</a>	2.3
<a href="#">SBR</a>	2.9
<a href="#">Silicone rubber</a>	3.2
<a href="#">PLEXIGLAS®</a>	3.4
<a href="#">PVC</a>	4.0
Glass	3.8-14.5
Distilled water	~80

Slika 6. Vrijednosti dielektrične konstante za određene materijale

Izvor: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/dielectric-constant>

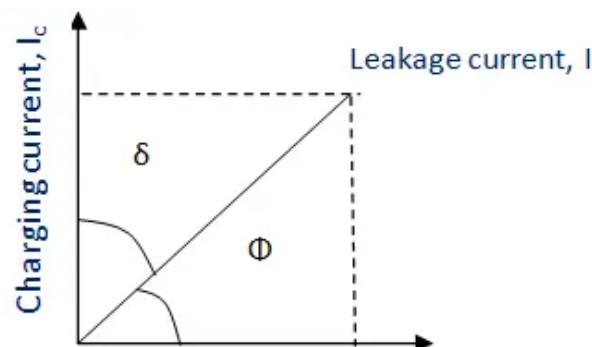
### 2.4.3. Faktor disipacije, kut gubitka i faktor snage

Kada se dielektričnom materijalu daje izmjenični napon, ne dolazi do iskorištenja energije. Savršeno se postiže samo vakuumom i pročišćenim plinovima. Ovdje možemo vidjeti da će struja punjenja biti ispred primjenjenog napona za  $90^\circ$ , što je prikazano na slici 7. To znači da nema gubitka snage u izolatorima. Ali u većini slučajeva dolazi do rasipanja energije u izolatorima kada se primjenjuje izmjenična struja. Taj je gubitak poznat kao dielektrični gubitak. U praktičnim izolatorima struja istjecanja nikada neće voditi primjenjeni napon za  $90^\circ$  što nam pokazuje slika 8. Kut formiran strujom propuštanja je fazni kut ( $\phi$ ). Bit će uvijek manje od  $90^\circ$ . Iz ovoga ćemo dobiti i kut gubitka kao  $90^\circ - \phi$  [9].



Slika 7. Struja punjenja u odnosu na primjenjeni napon

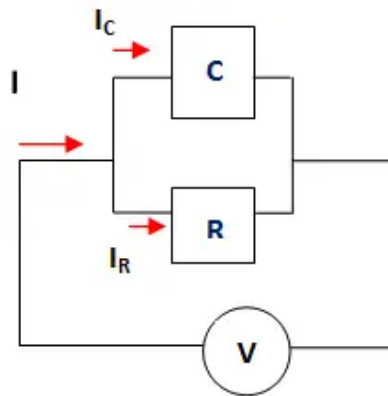
Izvor: [https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm\\_content=cmp-true](https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm_content=cmp-true)



Slika 8. Struja istjecanja u odnosu na primjenjeni napon

Izvor: [https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm\\_content=cmp-true](https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm_content=cmp-true)

Ekvivalentni krug s kapacitetom i otpornikom u paralelnom spoju predstavljen je u nastavku na slici 9.



Slika 9. Strujni krug s otporom i kapacitetom te pripadajućim strujama u paralelnom spoju

Izvor: [https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm\\_content=cmp-true](https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm_content=cmp-true)

Iz ovoga ćemo dobiti dielektrični gubitak energije kao:

$$P = VI \cos \phi = V \left( \frac{V}{X} \right) \cos \phi = 2\pi f C V^2 \sin \delta$$

X – Kapacitivna reaktancija ( $\frac{1}{2\pi f C}$ )

$\cos \phi - \sin \delta$

U većini slučajeva  $\delta$  je jako mala pa možemo uzeti da je  $\sin \delta = \tan \delta$ .

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{2\pi f C R}$$

$$\tan \delta = \sin(90^\circ - \phi) = \cos \phi$$

Znači,  $\tan \delta$  je faktor snage dielektrika

$$P = 2\pi f C V^2 \tan \delta \text{ [W]}$$

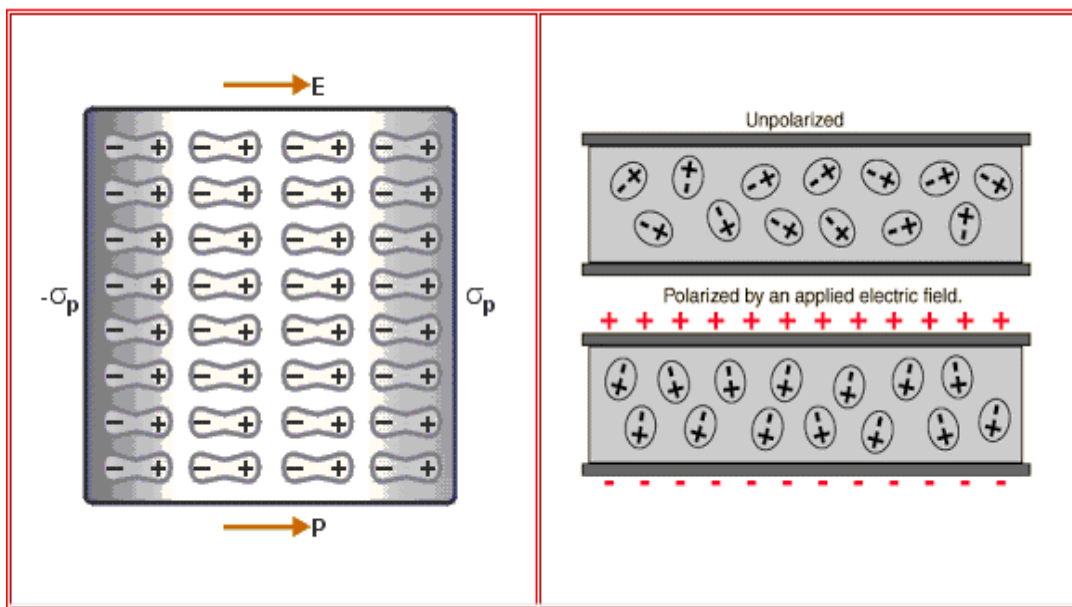
Vrlo je važno poznavanje svojstava dielektričnog materijala je u fazama planiranja i proizvodnje, ali isto tako tijekom funkcioniranja i recikliranja dielektričnih (izolacijskih) materijala i može se utvrditi izračunavanjem i mjerenjem.

Još jedna vrlo važna stvar koju treba napomenuti je ta da je faktor snage obično problem u AC krugovima odnosno krugovima izmjenične struje gdje fazna razlika između napona i struje može

rezultirati gubitkom energije. U DC krugovima ili krugovima istosmjerne struje faktor snage je uvijek 1 upravo zato jer ne postoji fazna razlika između napona i struje [9].

#### 2.4.4. Polarizacija

Dielektrična polarizacija nastaje kada se na dielektričnu tvar primjeni vanjsko električno polje. Kada se primijeni električno polje, ono uzrokuje pomicanje naboja (pozitivnih i negativnih). Primarni cilj dielektrične polarizacije je povezivanje makroskopskih i mikroskopskih karakteristika. Kada primjenjujemo vanjsko električno polje na nepolarnoj molekuli, svi protoni putuju u smjeru električnog polja dok elektroni putuju u suprotnom smjeru. Zbog prisutnosti električnog polja, ovaj se postupak nastavlja ukoliko ih unutarnje snage ne uravnoteže. Zbog toga postoji stvaranje dva centra naboja. Polarizirani su i nazivamo ih inducirani električni dipoli. Kad postavimo dielektričnu ploču u električno polje, tada molekula dobiva dipolni trenutak. U takvim slučajevima kažemo da je dielektrični polariziran. Električna polarizacija je dipolni trenutak po jedinici volumena dielektričnog materijala [11]. Polarizacijski proces možemo vidjeti na slici 10.



Slika 10. Polarizacijski proces

Izvor: <https://www.toppr.com/guides/physics/electrostatic-potential-and-capacitance/dielectrics-and-polarization/>

## **2.5. PRIMJENA IZOLACIJSKIH MATERIJALA**

Elektroenergetski sustav je vrlo komplicirani sustav koji se sastoji od mnogo različitih komponenti. Neke od njih su prekidači, kabeli, transformatori, rotacijski strojevi, kondenzatori snage, itd. Svaka komponenta koja čini sustav mora biti kvalitetno osigurana i izolirana. U elektroenergetskom sustavu postoje četiri važna područja primjene izolacije [2]:

1. izolacija faze prema zemlji (između zemlje i zavojnice)
2. izolacija faze prema fazi
3. izolacija između samih zavoja koji se nalaze u zavojnici
4. izolacija zavojnica iste faze

### **2.5.1. Izolacija transformatora**

Izolacija je vrlo važna komponenta transformatora kako bi se osigurao njihov siguran i učinkovit rad. Transformatori su električni uređaji koji se koriste za prijenos električne energije elektromagnetskom indukcijom iz jednog kruga u drugi. Izolacija u transformatorima se koristi na sljedeće načine [2]:

- Između namota:

Transformatori imaju više namotaja, uključujući primarne namote visokog napona i sekundarne namote niskog napona. Izolacija između namotaja se koristi da bi se spriječio električni kontakt i mogućnost nastanka kratkih spojeva. U svrhu izolacije obično se koriste materijali poput papira, kartona ili kompozita.

- Između slojeva:

Unutar svakog namotaja postoji više slojeva. Izolacijski materijali koriste se između ovih slojeva kako bi se spriječio nastanak kratkih krugova okretanja. Izolacija može biti u obliku papira, laka ili izolacijske trake.

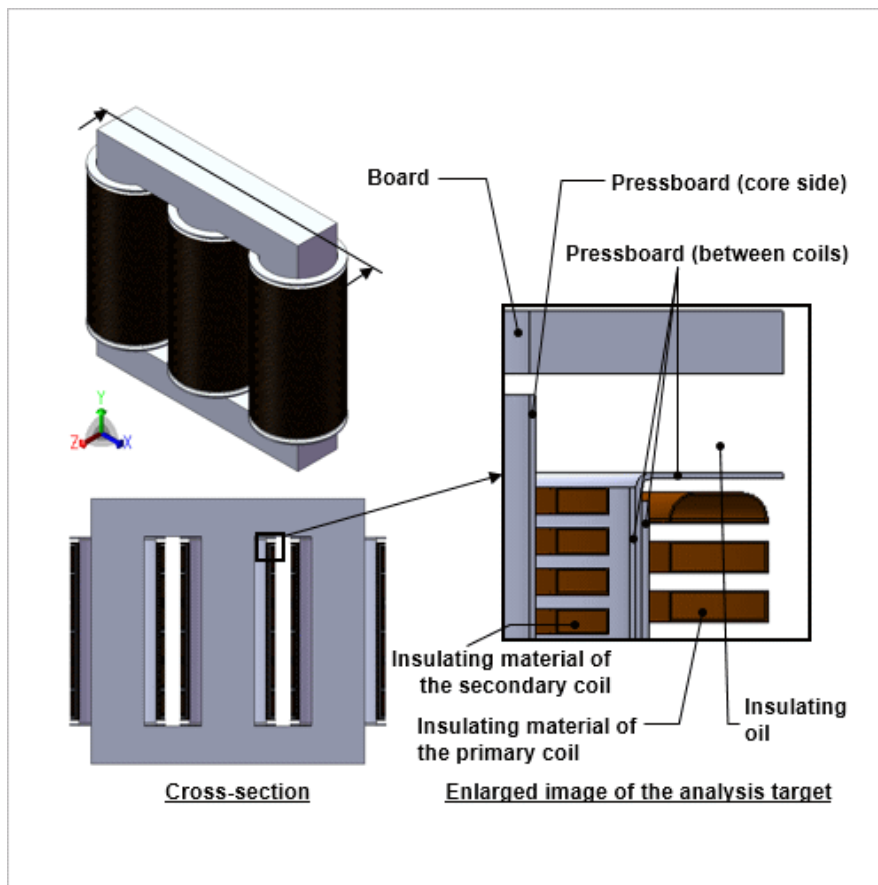
- Oko jezgre:

Jezgra transformatora je izrađena od čelika ili laminiranog željeza te je izolirana kako bi se spriječili gubici struje. Tanki slojevi izolacijskog materijala nanose se između laminacije jezgre kako bi se poboljšala učinkovitost i smanjili gubici energije.

- Izolacija spremnika:

Vanjski spremnik transformatora mora biti izoliran zbog vanjskih utjecaja kao što su vlaga i prašina. Izolacija također osigurava da jezgra i namoti ostanu suhi i čisti. Materijal koji se koristi za izolaciju u spremnicima obično je papir impregniran uljem ili kompozitni materijal.

Pravilna izolacija je ključan čimbenik u transformatorima zbog održavanje njihovih električnih performansi, sprečavanje električnih grešaka i produljenje radnog vijeka transformatora. Proizvođači transformatora moraju pažljivo odabrati i primijeniti izolacijske materijale kako bi udovoljili specifičnim naponskim, temperaturnim i okolišnim zahtjevima. Redovno održavanje i ispitivanje izolacije također je vrlo važan čimbenik za osiguravanje pouzdanosti i sigurnosti transformatora u električnoj mreži [12].



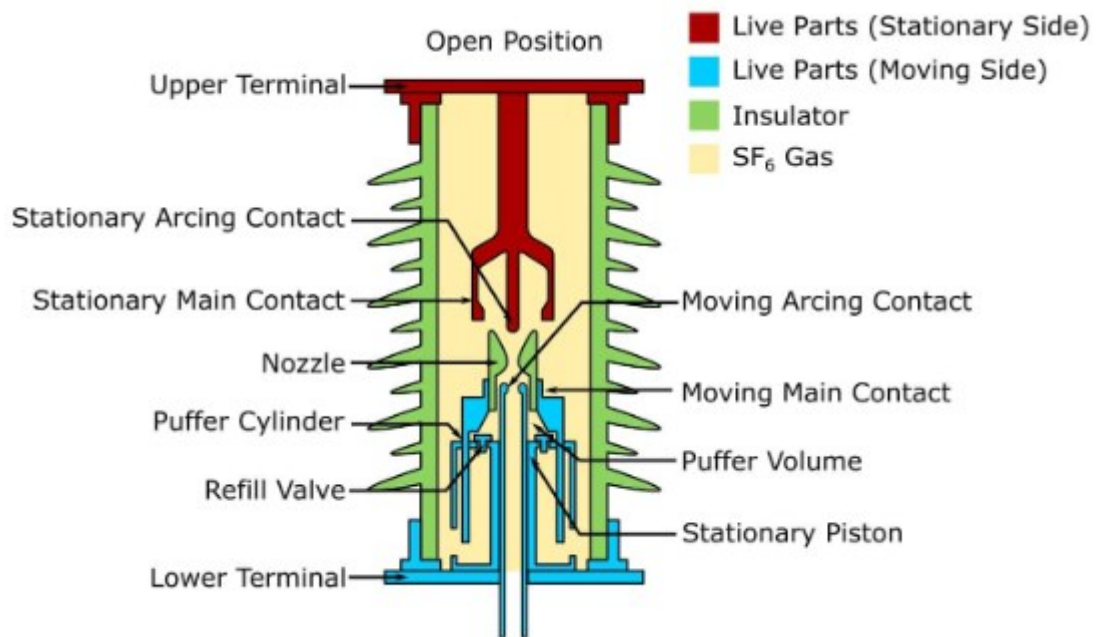
Slika 11. Izolacija transformatora i namotaja

Izvor: [https://www.jmag-international.com/catalog/151\\_powertransformerinsulation\\_evaluation/](https://www.jmag-international.com/catalog/151_powertransformerinsulation_evaluation/)



## 2.5.2. Primjena izolacije prekidača

Prekidač je element koji automatski prekida krug kada se premaši kritična struja ili napon. Izmjenične odnosno AC struje je znatno lakše prekinuti nego istosmjerne DC struje. Trenutni prekid izmjenične struje obično zahtijeva prvo zamjenu luka za dio kruga, a zatim njegovu deionizaciju kada struja prođe kroz nulu, tako da se luk više neće ponovno uspostaviti. Primjene prekidača su podijeljene u dvije kategorije, prekidači za niski napon i prekidači visokog napona. Prekidači niskog napona koriste sintetičke smole za nošenje metalnih dijelova. Za veće temperature koriste se keramički dijelovi. Kad je vjerojatno da će strujni luk doći u dodir s oblikovanim dijelovima, koriste se melanin ili neka posebna vrsta alkidnih smola zbog veće otpornosti. Danas većina aplikacija u prekidaču koji rade koristi  $SF_6$  plin ili vakuum kao izolacijski medij. Dok su vakuumski prekidači dostupni do napona od 33 kV,  $SF_6$  prekidači se proizvode do većeg napona prijenosa od 800 kV. Većina današnjih dizajna prekidača  $SF_6$  gotovo je sposobna raditi bez održavanja. To znači da bi lučni kontakti i mlaznice na prekidačima trebali imati dug radni vijek [12].



Slika 12. Glavni dijelovi SF<sub>6</sub> prekidača

Izvor: <https://savree.com/en/encyclopedia/sf6-circuit-breaker>

### 2.5.3. Primjena izolacije rotacijskih strojeva

Primjene rotacijskih strojeva obično se dijele u dvije kategorije: one s naponom manjim od 6,600 V nazivaju se strojevima niskog napona, a ostale su strojevi visokog napona. Zbog poteškoća u izoliranju visokih napona, strojevi iznad 22 kV ne grade se, osim u posebnim uvjetima. Izolacija klase Y i C ne nalazi aplikacije rotirajućih strojeva. Klasa E koja se široko koristila u strojevima niskog napona više od 20 godina sada se zamjenjuje razredom F koja je namijenjena visokonaponskim strojevima. Također, klasa F sve se više koristi umjesto klase B. Čini se da je klasa F izolacija budućnosti. Posljednjih godina postignut je znatan napredak u smanjenju veličine strojeva za datu ocjenu korištenjem materijala klase H, posebno za male strojeve. Međutim, troškovi materijala klase H (silikoni, teflon) vrlo su visoki, pa se stoga koriste samo u posebnim uvjetima poput jakih preopterećenja vučnih motora. U modernoj izolacijskoj praksi postoje različiti zahtjevi izolacijskog materijala za uporabu u električnim generatorima i motorima. Odabir pravog materijala ovisi o ocjeni snage motora i uvjetima pod kojima djeluje. Danas je višeslojna izolacija izrađena od prešanog i poliesterskog filma, Nomex i poliesterskog filma ili netkanog poliesterskog filma, sa ili bez impregnacije. Za primjene vrlo visoke temperature koriste se višeslojni slojevi izrađeni od Nomex ili Kapton polimidnog filma.

U slučaju generatora, posebno važan parametar je izolacija rotora i statora i njegova pouzdanost. Pojedinačni proizvođači razvili su vlastite izolacijske sustave i primjene, ako ih ima, izolacijski sustavi rade se vrlo pažljivo. Dugi niz desetljeća rotori su izolirani jednoslojnim staklom, tvrdim ili staklenim tkaninama i / ili Nomexom. Koriste kao izolacija namotaja ali i kao izolacija utora. Održavanje dobrih mehaničkih svojstava također je jednako važno za pouzdan rad strojeva. Izolacija bi trebala izdržati širenje i kontrakciju tijekom temperaturnih ciklusa u velikim strojevima. Ti učinci postaju vrlo ozbiljni pri visokim temperaturama opaženim u generatorima snage vrlo velike veličine. Održavanje dobrih mehaničkih svojstava i toplinska izdržljivost također su vrlo važni u strojevima niskog napona [12].

#### 2.5.3.1. Klase izolacije

Izolacije su podijeljene u različite klase prema temperaturi na kojoj rade. Klase izolacije su sljedeće [13]:

- Klasa A za maksimalnu temperaturu od 105 °C
- Klasa E za maksimalnu temperaturu od 120 °C
- Klasa B za maksimalnu temperaturu od 130 °C
- Klasa F za maksimalnu temperaturu od 155 °C

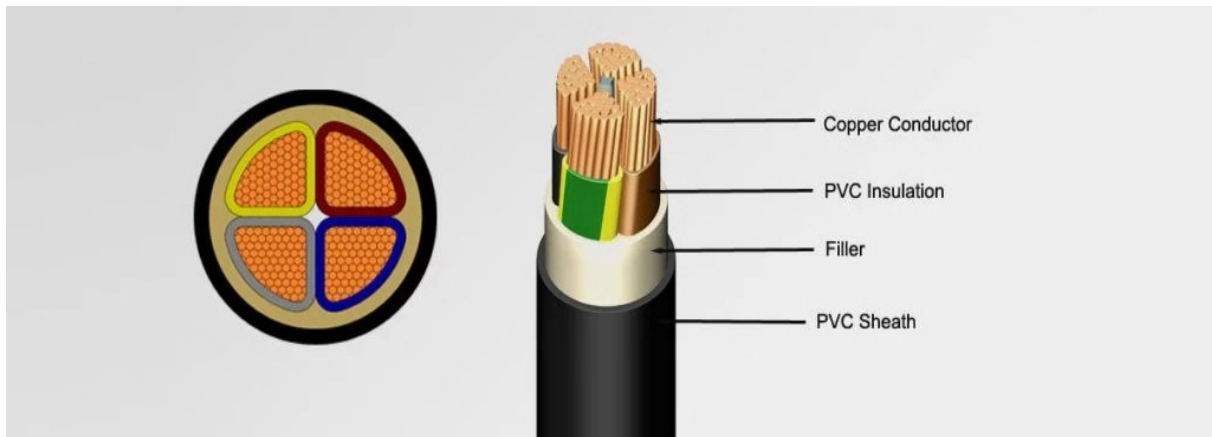
- Klasa H za maksimalnu temperaturu od 180 °C
- Klasa C za maksimalnu temperaturu višu od 180 °C

#### 2.5.4. Izolacija kabela

Posljednjih godina izolacija prirodnom gumom u potpunosti je zamijenjena sintetičkim gumama i plastikom. Fizička svojstva potrebna za izolaciju žica i kabela ovise o vrsti primjene kablova u inženjerskim radovima. Kabel bi trebao imati dobro izduženje, vlačnu čvrstoću i žilavost, tako da može izdržati rukovanje tijekom instalacije i servisa. Također bi trebao imati nisku dielektričnu konstantu i faktor snage, ali visoku dielektričnu čvrstoću i otpornost na izolaciju. Također, tijekom rada, zbog preopterećenja, izolacija može biti izložena visokim temperaturama kroz dugo vremensko razdoblje. To zahtijeva da izolacija ima izvrsnu otpornost pri visokim temperaturama. Izolacija bi također trebala biti u stanju podnijeti dugu izloženost suncu i raznim kemikalijama. Kablovi se u nekim slučajevima također postavljaju i u mora, rijeke i jezera pa bi za takve primjene trebali imati dobru otpornost na vodu. Kad kablovi moraju raditi na niskoj temperaturi, izolacija ne smije postati kruta i krhka. Nijedna izolacija nije savršena tako da bi i mogući djelomični ispusti u kablovskoj izolaciji također bi trebali biti što niži.

Glavne vrste izolacijskih materijala koji se koriste u kablovskoj industriji su papir, guma, plastika i komprimirani plin. Kabeli izolirani papirom i dalje se koriste zbog njihove pouzdanosti, visoke dielektrične čvrstoće, niskog dielektričnog gubitka i dugog životnog vijeka. Najčešće korišteni izolacijski materijali za kablove niskog i srednjeg napona odnosno napona do 3,3 kV je plastična masa polivinil klorid odnosno PVC ali također se koristi i polietilen. Polivinil klorid ili PVC nije pogodan za primjene visokog napona zbog visoke dielektrične konstante i velikog gubitka. Ne može se raditi kontinuirano na većim naponima, iako se može koristiti do 85 ° C kontinuirano pri malim naponima. S druge strane, polietilen ima nisku dielektričnu konstantu i mali gubitak, ali visoku dielektričnu čvrstoću.

Najbolji materijal za rad visokog napona i visoke temperature je teflon koji se može koristiti do 250 ° C. Silikonska guma ima visok stupanj otpornosti na toplinu za kontinuirani rad do 150 ° C. To stvara vrlo malo stvaranja ugljika kada se uništi vatrom, i kao takav nastavlja funkcionirati čak i nakon požara. Stoga se koristi za zrakoplovne kablove kod kojih može doći do onečišćenja zrakoplovnim gorivom pri vrlo visokim temperaturama [12].



Slika 13. PVC izolacija kabela

Izvor: <https://www.kvcable.com/products/insulated-cable/>

### 3. ISPITIVANJE KVALITETE IZOLACIJE

Ispitivanje električne opreme obično se provodi na novoj opremi nakon ugradnje i na postojećoj opremi radi procjene njezinog stanja. Proizvođač provodi električna ispitivanja na opremi prije nego što oprema napusti tvornicu ti testovi se još nazivaju i tvornički. Zatim postoje terenska ispitivanja koja se provode da se vidi je li novo ugrađena oprema oštećena i kako bi se ukazalo je li potrebno korektivno održavanje ili zamjena na postojećoj opremi.

#### 3.1. VRSTE TESTOVA

S obzirom na navedene ciljeve, električno ispitivanje opreme može se podijeliti na sljedeća ispitivanja [14].

- Testovi prihvaćanja
- Rutinski testovi održavanja
- Specijalni testovi održavanja

### **3.1.1. Testovi prihvatanja**

Ova su ispitivanja poznata kao ispitivanja pokretanja ili puštanja u pogon i izvode se na novoj opremi, obično nakon ugradnje i prije napajanja. Kada se ovi testovi ponove u roku od godinu dana, to je prije isteka jamstvenog roka, tada se ti testovi nazivaju dokaznim testovima. Ispitivanja ove vrste obavljaju se na 80% konačne vrijednosti tvorničkog ispitnog napona. Oni se izvode kako bi odredili sljedeće [14]:

- Da li je oprema u skladu s specifikacijom
- Da bi se uspostavila referentna vrijednost za buduće testove
- Da bi se utvrdilo da je oprema instalirana bez oštećenja
- Da bi se provjerilo ispunjava li oprema svoju funkciju i ograničenje

### **3.1.2. Rutinski testovi održavanja**

Ova se ispitivanja izvode u redovitim intervalima tijekom radnog vijeka opreme. Izrađuju se istodobno s PM-om i sa 60% konačne tvorničke vrijednosti ispitnog napona. Tijekom rutinskih testova održavanja, vrlo je korisno zabilježiti podatke koji se nalaze na opremi i također zabilježiti stanje u kojem je oprema ostavljena. Rutinski testovi se mogu dalje podijeliti na sljedeće:

#### **1. Oprema u pronađenom stanju**

- Ova ispitivanja se izvode na opremi po primitku ili nakon što je izvučen iz službe za održavanje, ali prije nego što se obave radovi na održavanju.

#### **2. Oprema u ostavljenom stanju**

- Ova ispitivanja se izvode nakon održavanja i neposredno prije ponovnog pokretanja. Oni mogu navesti stupanj poboljšanja opreme i usluge kao mjerilo za usporedbu za buduće testove.

### **3.1.3. Specijalni testovi održavanja**

Ova ispitivanja izvode se na opremi za koju se zna da je neispravna ili je podvrgnut nepovoljnim uvjetima koji mogu utjecati na njegove radne karakteristike. Primjer može biti prekid kvara prekidača, što zahtijeva inspekciju, održavanje i ispitivanja prije nego što se može vratiti u funkciju [14].

## **3.2. VRSTE ISPITNIH METODA**

Za svaka od navedena 3 ispitna procesa postoje i različite metode ispitivanja koje se primjenjuju a one su sljedeće [14]:

- Ispitivanje čvrste izolacije
- Ispitivanje izolacijske tekućine
- Ispitivanje releja i zaštitnih uređaja
- Ispitivanje prekidača
- Ispitivanje i analiza plina
- Infracrveno ispitivanje

### **3.2.1. Ispitivanje čvrste izolacije**

Ispitivanje izolacije provodi se radi utvrđivanja integriteta izolacijskog medija. Obično se sastoji od primjene visokog potencijalnog napona na ispitivani uzorak i određivanja struje istjecanja koja se može pojaviti u uvjetima ispitivanja. Prekomjerne struje istjecanja mogu ukazivati na pogoršano stanje ili predstojeći neuspjeh izolacije. Ispitivanje izolacije izvodi se primjenom DC napona odnosno napona istosmjerne struje ili napona izmjenične struje odnosno AC. Ispitivanje čvrste izolacije s tim naponima može se podijeliti u dvije kategorije, nerazorno ispitivanje i razorno ispitivanje. Razorni test može prouzrokovati oštećenje opreme koja se ispituje ili je učiniti neprikladnom za daljnju uslugu. Nerazorna ispitivanja izvode se pri niskom naponu, a oprema koja se ispituje rijetko je oštećena. Ispitivanje izmjeničnim naponom se odvija tako da se napon prvo podiže na specificiranu razinu. Ako oprema ne radi ili pokazuje prekomjernu struju istjecanja, oprema koja se ispituje je neupotrebljiva. Ako oprema nastavi sa radom, uspješno je podnijela ispitivanje. Ovaj test može samo odrediti je li oprema dobra ili loša, ali ne može odrediti s kojom je sigurnosnom granicom zadovoljila ispitivanje. Međutim, postoje nerazorna ispitivanja koja se mogu izvesti s izmjeničnim naponom, kao što je faktor snage, kapacitivnost

itd. DC ispitivanje provodi se radi dobivanja informacija za usporednu analizu na periodičnoj osnovi. Ovakvim ispitivanjem, struja istjecanja mjeri se tijekom napretka ispitivanja i uspoređuje s trenutnim vrijednostima istjecanja iz prethodnih ispitivanja. Međutim, ispitivanje DC naponom smatra se destruktivnim testom ako se ispitni napon ne primijeni u unaprijed određenim koracima upravljačkog napona. Ispitivanja istosmjernog napona mogu se izvesti pri nižim naponima, koji spadaju pod nerazorna ispitivanja, poput izolacijskog otpora i dielektričnog apsorpcijskog omjera [14].

### **3.2.2. Ispitivanje izolacijske tekućine**

Izolacijske tekućine koje se koriste u transformatorima ili drugim električnim aparatima podliježu propadanju i zagađenju tijekom određenog vremenskog razdoblja. Ova onečišćenja štetno utječu na izolacijska svojstva fluida, kao i na sustav čvrste izolacije namotaja transformatora. U osnovi, elementi koji uzrokuju propadanje izolacijske tekućine su vlaga, toplina, kisik i drugi katalizatori koji rezultiraju kemijskom reakcijom koja stvara kiselinu i mulj, koji zauzvrat napadaju izolacijske pločice. Za praćenje stanja izolacijske tekućine preporučuju se redovna ispitivanja [14].

### **3.2.3. Ispitivanje prekidača**

Ispitivanje prekidača nužno je kako bi se utvrdilo radi li upravljački mehanizam prekidača ispravno. Ovo ispitivanje se obično izvodi na srednje i visokonaponskim prekidačima i prikazuje položaj prekidačkih kontakata u odnosu na vrijeme. Taj se odnos tada može koristiti za određivanje radne brzine prekidača za otvaranje i zatvaranje i odskok kontakta, te intervalnog vremena za zatvaranje i isključivanje. Podaci o radnom vremenu prekidača mogu se koristiti za procjenu stanja mehaničkih dijelova prekidača, kao što je mehanizam za zatvaranje [14].

## **3.3. ISPITIVANJE IZOLACIJE ROTIRAJUĆIH STROJEVA**

Rotirajući strojevi, poput motora i generatora, vrlo su važne komponente u proizvodnji električne energije i industrijskoj primjeni. Pouzdanost i dostupnost stroja stoga su velika potražnja. Preuranjeni neuspjeh može dovesti do značajnih ekonomskih gubitaka zbog neočekivanih kvarova i moguće štete samoj imovini. Za učinkovito planiranje održavanja, bitno je imati točne podatke o stanju

kada se komponente trebaju popraviti ili zamijeniti. Rotirajući strojevi tijekom obavljanja njihovih funkcija izloženi su raznim naprezanjima kao što su [14]:

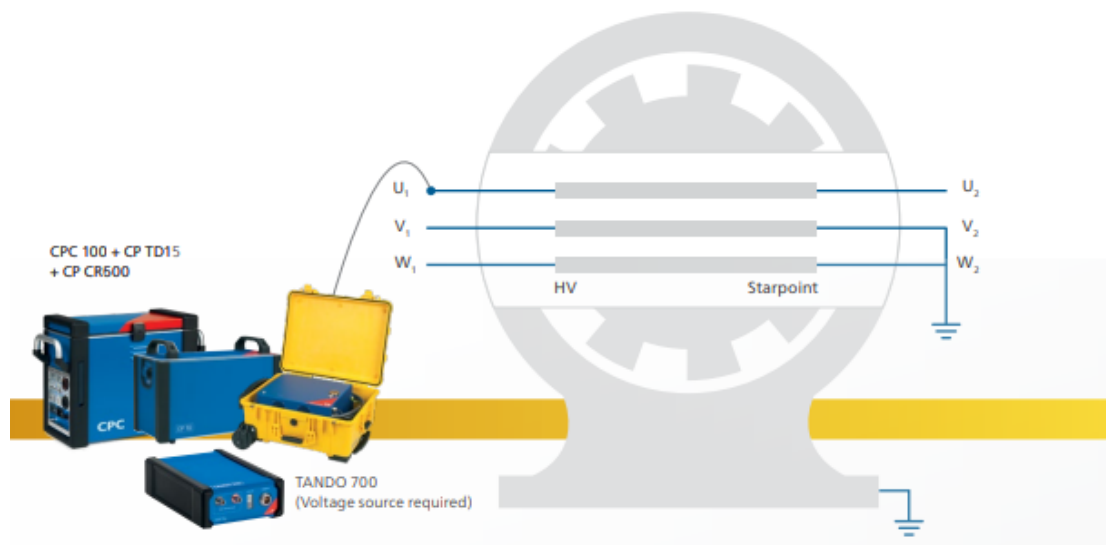
- Termalna (Najviša i najniža temperatura, preopterećenje, žarišta)
- Električna (Djelomično pražnjenje, visoki naponi)
- Mehanička (Vibracije i oscilacije)
- Utjecaj okoline (Agresivne i reaktivne kemikalije, abrazivne čestice, kontaminacija)

Električna izolacija također podliježe utjecaju tih naprezanja te mogu značajno oštetiti svojstva dielektrika. Izolacijski sustavi rotirajućih strojeva zahtijevaju brojne ispitne metode koje su dio alata za ispitivanje te se mogu podijeliti u on-line i off-line metode.

### **3.3.1. Mjerenje faktora disipacije, faktora snage i kapaciteta**

Mjerenja kapaciteta, faktora snage i faktora disipacije provedena su radi utvrđivanja oštećenja koja utječu na stanje izolacije stroja. Zdrava izolacija ključna je za siguran rad. Varijacije u ovim faktorima tijekom vremena često su znakovi djelomičnog pražnjenja ili degradacija izolacije. Podaci koje nam oni pokazuju pomažu u određivanju brzine izolacije starenja i identificirati kritične promjene koje mogu zahtijevati daljnju inspekciju. Mjerenje se odvija na sljedeći način. U kombinaciji s visokonaponskim izvorom, mjerni instrument je spojen na terminale stroja za mjerenje faza pa sve do zemlje ili kombinirano trofazno mjerenje ako zvjezdana točka nije dostupna. Mogu se izvršiti i mjerenja faze do faze kako bi se provjerila krajnja kapacitivnost namotaja. Faktor disipacije i faktor snage se obično mjere u određenom rasponu napona ( $U / U_n$ ). Tipični početni napon i dozvoljeni porast je  $0,2 U_n$ . Kao ostali početni uvjeti mogu se odabrati točke, poput  $0,1 U_n$ . Usporedba se vrši ili od faze do faze ili s prethodnim mjerenjima. Navedeni faktori su definirani prema internacionalnim standardima i moraju se strogo poštivati [15].





Slika 14. Način mjerenja faktora disipacije, faktora snage i kapaciteta

Izvor: <https://www.omicronenergy.com/download/document/40CEA890-3E5B-447D-BEF5-51CBE544A6E0/>

### 3.3.2. Mjerenje djelomičnog pražnjenja

Djelomična pražnjenja javljaju se u izolacijskom sustavu rotirajućih strojeva, gdje lokalni napon električnog polja premašuje lokalnu električnu snagu. Djelomično pražnjenje uzrokuje progresivnu eroziju izolacijskih materijala što može dovesti do njihovog kvara. U usporedbi s drugim dielektričnim testovima na rotirajućim strojevima, razlikovanje u mjerenjima djelomičnog pražnjenja omogućava da se jasno identificiraju pojedinačne slabe točke izolacijskog sustava. Analizom uzoraka mogu se utvrditi specifični korijenski uzroci, poput onečišćenja, praznina, pukotina, starenja ili opće propadanje različitih izolacijskih komponenti [15].

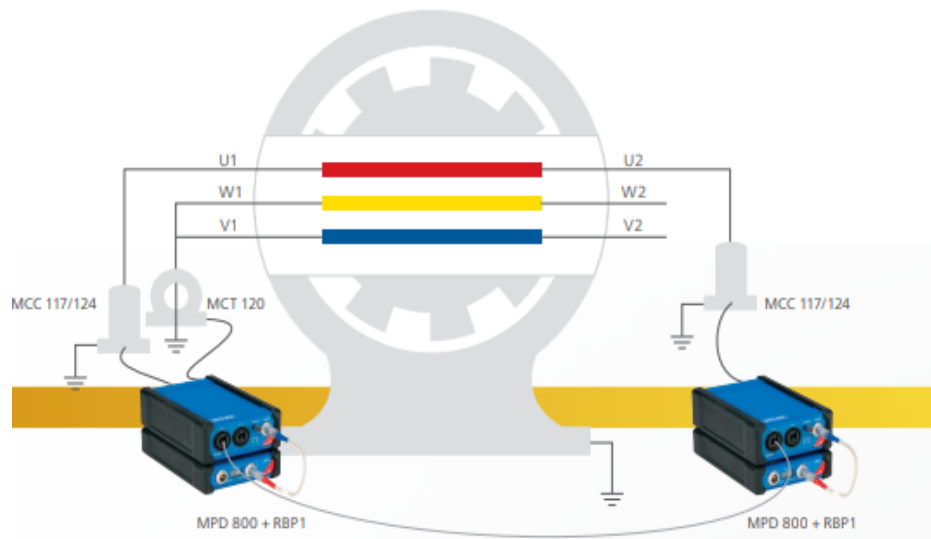
Dva su načina mjerenja djelomičnog pražnjenja rotacijskog stroja:

- Off – line
- On – line

#### 3.3.2.1. Off-line

Mjerenje off-line metodom provodi se kada se stroj odvoji iz upotrebe i napaja se visokonaponskim izvorom. Kondenzator za spajanje spojen je na stezaljke stroja koji je spojen na uređaj za mjerenje.

Ovisno o tome je li zvijezdište dostupno, može se izvršiti jednofazno mjerenje. Inače, trofazno mjerenje u kombinaciji s tehnikama odvajanja izvora omogućava vam prepoznavanje aktivnosti u određenoj fazi. Nekoliko mjerenja tijekom vremena omogućuju praćenje stanja izolacije, što je najmoćniji način prepoznavanja greške u ranoj fazi [15].

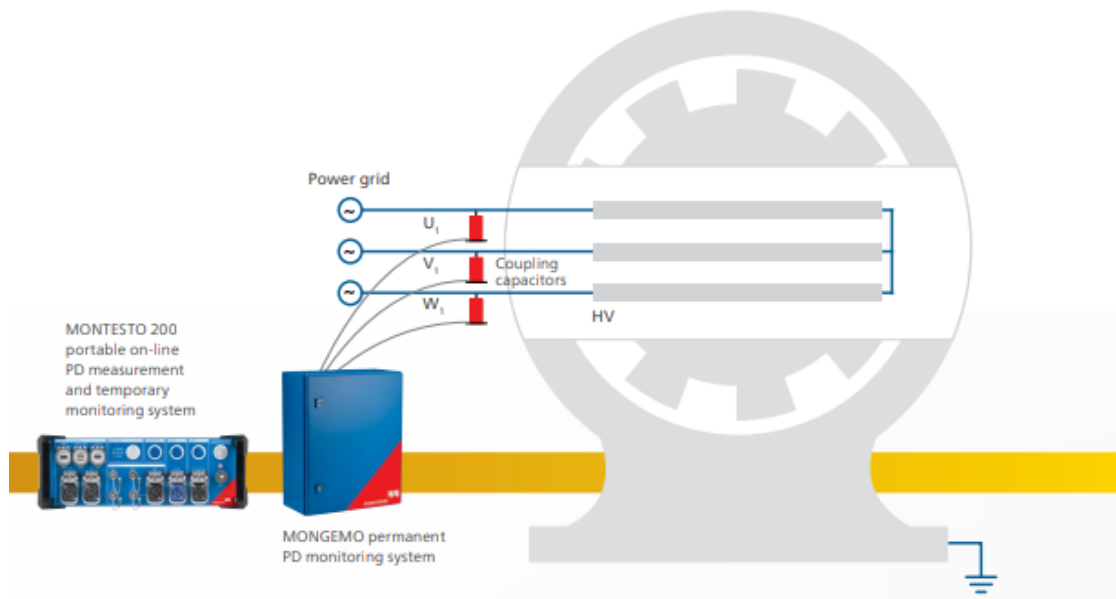


Slika 15. Off-line metoda mjerenja djelomičnog pražnjenja

Izvor: <https://www.omicronenergy.com/download/document/40CEA890-3E5B-447D-BEF5-51CBE544A6E0/>

### 3.3.2.2. On-line

U usporedbi s rutinskim Off-line ispitivanjima, nadzor on-line djelomičnog pražnjenja pruža kontinuirani status praćenja stanja izolacije dok motori i generatori rade. Ovakvo praćenje je odlično jer operateri strojeva mogu odlučiti je li i kada potrebno zakazati stanke i izvršiti održavanje. Mjerenje se vrši na način da su kondenzatori za spajanje spojeni na svaku fazu na terminalima kada je stroj izvan upotrebe. Jedinica za prikupljanje podataka tada je spojena na kondenzatore za spajanje. Mobilna radna stanica ili središnje računalo spojeno je optičkim kabelom na akvizicijska jedinica za postavljanje sustava, administraciju i pristup podacima pomoću softvera. Kontinuirana usporedba izmjerenih vrijednosti u svakoj fazi vrši se s korisnički definiranim pragovima. Upozorenja i alarmi pokazuju kada su takvi pragovi premašeni [15].

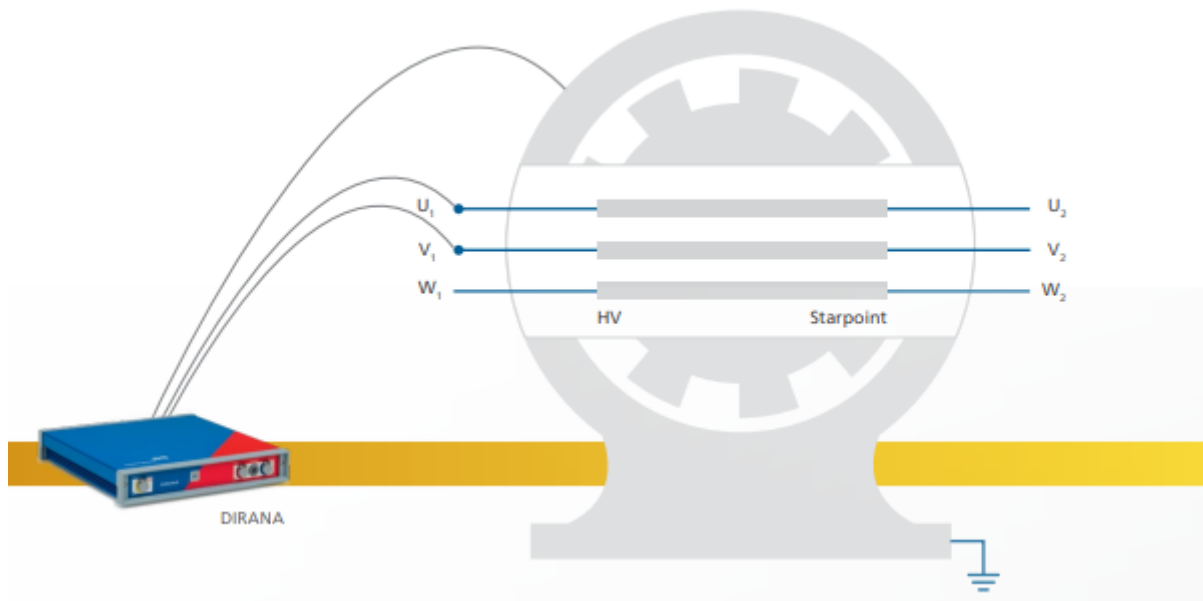


Slika 16. On-line metoda mjerenja djelomičnog pražnjenja

Izvor: <https://www.omicronenergy.com/download/document/40CEA890-3E5B-447D-BEF5-51CBE544A6E0/>

### 3.3.3. Mjerenje izolacijskog otpora, polarizacijskog indeksa i dielektričnog omjera apsorpcije

Mjerenja izolacijskog otpora, indeksa polarizacije i dielektričnog apsorpcijskog omjera korisna su za provjeru namotaja stroja zbog mogućih onečišćenja i propadanja izolacije. Također su korisni za procjenu integriteta izolacije kako bi se osigurao siguran rad, kao i za provjeru vlage u namotajima statora nakon dugog razdoblja mirovanja. Za mjerenje otpora izolacije primjenjuje se konstantan istosmjerni napon između vodica i zemlje. Za određivanje polarizacijskog indeksa, mjerenje izolacijskog otpora se provodi 10 minuta. Polarizacijski indeks je omjer 10-minutnog očitavanja podijeljen s 1-minutnim očitavanjem vrijednosti izolacijskog otpora. Dielektrični omjer apsorpcije je također omjer dviju vrijednosti izdržavanja tijekom vremena. Ovdje se često koristi vrijednost od 60 sekundi do 30 sekundi. U usporedbi s drugim fazama ili prethodnim mjerenjima, niže vrijednosti dielektričkog omjera apsorpcije ukazuju na moguće slabosti visokonaponske izolacije [15].

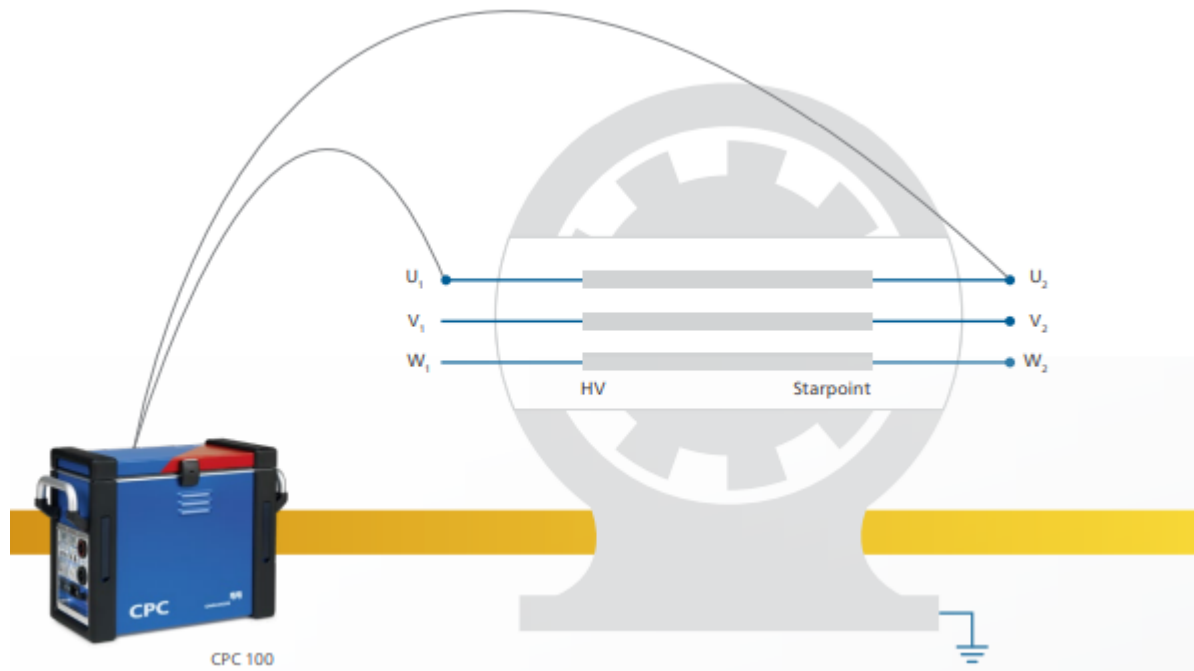


Slika 17. Postupak mjerenja izolacijskog otpora, indeksa polarizacije i dielektričnog apsorpcijskog omjera

Izvor: <https://www.omicronenergy.com/download/document/40CEA890-3E5B-447D-BEF5-51CBE544A6E0/>

### 3.3.4. Mjerenje istosmjernog otpora

Mjerenja istosmjernog otpora provode se kako bi se otkrili mogući problemi kontakta u namotima statora i rotora. Problemi s spajanjem mogu se pojaviti između pojedinih zavojnica, namotaja ili na konektorima u rotoru. Oni uzrokuju lokalna žarišta, što na kraju može oštetiti stroj. Tipično podrijetlo ovih grešaka uključuje loše lemljenje kontakata, koji postaju slabiji tijekom rada ili labave veze, kao i oksidirane ili oštećene površine na priključcima stroja. Za mjerenje istosmjernog otpora, mjerni instrument spojen je na izlaze stroja. Struja istosmjerne struje i istosmjerni napon mjere se istodobno za svaku fazu i izračunava se otpor. Podaci pokazuju usporedbu između faza s prethodnim mjerenjima. Varijacija ukazuje na potencijalni problem kontakta. Za mjerenje kontaktnog otpora, npr. na polnim konektorima između kontakata se ubrizgava visoka istosmjerna struja. Također se u ovom slučaju mjerenje uspoređuje s drugim mjerenjima ili s prethodnim podacima [15].



Slika 18. Prikaz mjerenja istosmjernog otpora

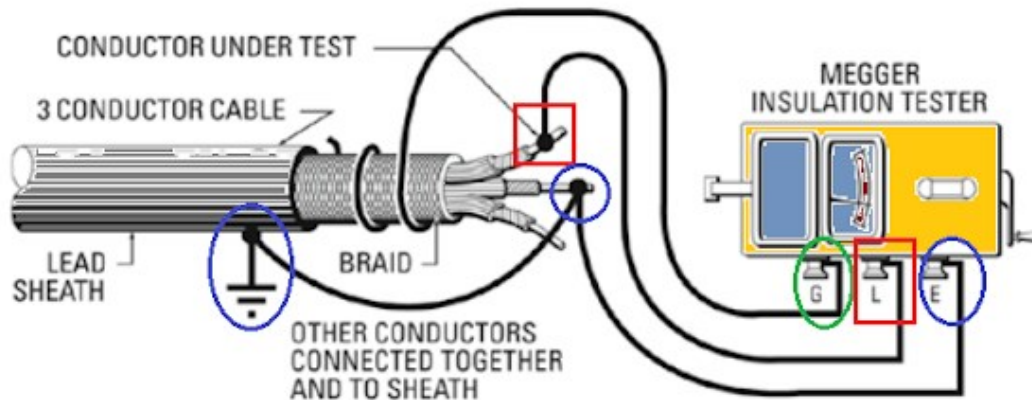
Izvor: <https://www.omicronenergy.com/download/document/40CEA890-3E5B-447D-BEF5-51CBE544A6E0/>

### 3.4. ISPITIVANJE IZOLACIJE KABELA

Proizvodnja, prijenos i distribucija energije uključuje električne uređaje i komponente za prijenos električne energije s njenog proizvodnog mjesta na mjesto gdje se koristi. Važan dio ovog elektroenergetskog sustava je kablanski sustav srednjeg napona koji se koristi isključivo za prijenos snage s glavne trafostanice u sekundarne podstanice u centrima opterećenja. Niskonaponski kabel koristi se za raspodjelu snage iz centara. Električna, mehanička i ekološka razmatranja glavni su čimbenici u odabiru i primjeni kablovskih sustava za distribuciju i korištenje električne energije. Sastavi srednjenaponskih kabela ili priključaka različitih vrsta kabela (poput aluminijskog i bakrenog) zahtijevaju pažljivo razmatranje i procjenu tijekom instalacije, kao i tijekom njihovog životnog vijeka. Ispravna instalacija i preventivno održavanje kablovskih sustava osigurat će neprekidnu uslugu električne energije.

Nakon što je instaliran novi kabel i prije nego što se napaja, potrebno je izvršiti ispitivanje prihvaćanja. Općenito, test dokaza o prihvatu provodi se na 80% maksimalnog tvorničkog ispitnog napona. Također, rutinska ispitivanja mogu se provoditi na terenu na instaliranim kablovima kao ispitivanja održavanja. Rutinska ispitivanja održavanja provode se na 60% konačnog tvorničkog ispitnog napona. Sljedeća ispitivanja mogu se provesti na terenu za prihvaćanje i održavanje kablova [14]:

- Izolacija otpora i DC hi-pot ispitivanje
- AC hi-pot ispitivanje
- Ispitivanje faktora snage (PF) i faktora disipacije (DF)
- Ispitivanja na niskim frekvencijama (VLF)



Slika 19. Ispitivanje otpora izolacije kabela

Izvor: <https://gkikasvasilios.blogspot.com/2019/02/megger-test-preveza-lefkas-ionian.html>

### 3.4.1. Izolacija otpora i DC hi-pot ispitivanje

Pri ispitivanju kabela istosmjernim naponom treba shvatiti da istosmjerni napon stvara unutar kablovskog izolacijskog sustava električno polje određeno vođenjem i geometrijom kablovskog izolacijskog sustava. Međutim, normalan radni napon koji se primjenjuje na kabel je izmjenični napon od 60 Hz, dakle tijekom normalnih servisnih uvjeta izmjenični napon stvara električnu filiju koja je određena dielektričnom konstantom (kapacitancem) izolacijskog sustava. Stoga će raspodjela električnog napona s istosmjernim naponom biti drugačija nego kod izmjeničnog napona. Na vodljivost utječe temperatura u većoj mjeri, a ne dielektrična konstanta, stoga će na komparativnu raspodjelu električnog naprežanja pod istosmjernim i izmjeničnim naponima različito utjecati promjene temperature u izolaciji. DC naponski testovi učinkoviti su u otkrivanju kvarova koji pokreću toplinski mehanizam. Vrijednost dijagnostičkih ispitivanja istosmjernog napona za izolaciju donekle je ograničena, jer kvarovi u uvjetima servisnog izmjeničnog napona najvjerojatnije uzrokuju distorziju snage. S druge strane, dijagnostička ispitivanja istosmjernog napona vrlo su značajna za izolacijski sustav laminiranog tipa gdje će kvar vjerojatno biti potaknut toplinskim mehanizmom [14].

### 3.4.2. AC hi-pot ispitivanje

Kablovi i pribor mogu se također testirati s izmjeničnim naponom, iako se to obično ne radi zbog zahtjeva za teškom, glomaznom, i skupom ispitnom opremom koja možda nije lako dostupna ili prenosiva na neko mjesto. Najčešći terenski testovi izvedeni na kablovima su DC hi-pot ili VLF testovi umjesto AC hi-pot testova. Međutim, ako se na kablovima provode AC hi-pot testovi prihvatanja i održavanja, tada treba imati na umu da ovaj test nije baš praktičan na terenu. Nadalje, AC hi-pot test može se provesti samo u smislu ili radi ili ne radi, pa stoga može izazvati veliku količinu oštećenja ako ispitivani kabel ne uspije, tj. tijekom ispitivanja se dogodi razorni iscjedak kroz izolaciju. S druge strane, AC hi-pot test ima izrazitu prednost u odnosu na druge ispitne metode naprezanja izolacije usporedivo s normalnim radnim naponom. Nadalje, ovaj test ponavlja tvornički test izveden na novom kabelu. Pri izvođenju izmjeničnog napona 60 Hz treba uzeti u obzir adekvatnost ispitne opreme za uspješno punjenje ispitnog uzorka. AC ispitna oprema trebala bi imati odgovarajući kapacitet napona za opskrbu potrebnim zahtjevima struje punjenja ispitivanog kabela. Vrijednosti ispitnog napona preporučene za ispitivanja prihvatljivosti i održavanja su 80%, odnosno 60%, ispitnog napona tvornice. Ispitni priključci slični su priključcima koji se koriste za istosmjerno ispitivanje kabela [14].

### 3.4.3. Ispitivanje faktora snage (PF) i faktora disipacije (DF)

PF i DF mogu se izvoditi na zaštićenim kablovskim sustavima zbog utvrđivanja degradacije izolacije radi smanjenja kvarova kabela. PF testovi za zaštićene ili obložene kablove i pribor opisani su kao dijagnostičke tehnike ispitivanja za terensko ispitivanje uslužnih kablovskih sustava. Za izolaciju bez gubitaka, kabela kapacitivnost ( $C$ ) po jedinici duljine može se definirati sljedećom jednačinom [14]:

$$C = 2\pi k e_0 \ln \left( \frac{d_i}{d_c} \right)$$

Gdje su:

- $k$  - dielektrična konstanta izolacije
- $e_0$  – permitivnost zraka
- $d_i$  – promjer preko izolacije
- $d_c$  – promjer vodića

Za kabel s uobičajenim izolacijskim materijalima, vodljivost kabela (G) po jedinici duljine može se definirati sljedećom jednačbom:

$$G = 2\pi f C \tan \delta$$

$\tan \delta$  daje gubitke u izolaciji kada je podvrgnut električnom polju i poznat je kao kut gubitka izolacijskog materijala. Tablica na slici 20. sadrži tipične vrijednosti dielektrične konstante  $k$  i  $\tan \delta$

Type of Insulation	$k$	$\tan \delta$
Impregnated paper	3.5	$2.3 \times 10^{-3}$
Impregnated PPP	2.7	$0.7 \times 10^{-3}$
PVC	5.8	$0.7 \times 10^{-2}$
XLPE	2.3	$0.1 \times 10^{-3}$
HDPE	2.3	$0.1 \times 10^{-3}$
EPR	2.8	$3.5 \times 10^{-3}$

Slika 20. Vrijednosti dielektrične konstante nekih izolacijskih materijala

Izvor: Gill, Paul. "Electrical Power Equipment Maintenance and Testing." *Power Engineering (Willis)* (2016): 587–702. Web.

#### 3.4.4. Ispitivanja na niskim frekvencijama (VLF)

Ispitivanje vrlo niske frekvencije (VLF) provodi se s izmjeničnim naponom na frekvenciji u rasponu od 0,01 do 1 Hz. VLF test može se klasificirati kao izdržavanje ili dijagnostički test, tj., može se izvesti kao dokazni test za prihvaćanje ili kao test održavanja za procjenu stanja stanja kabela. Za test izdržljivosti, ispitivana izolacija mora izdržati određeni napon koji je viši od radnog napona preko izolacije tijekom određenog vremenskog razdoblja bez probijanja izolacije. Jačina napona koji je izdržao obično je veća od radnog napona. Ako se VLF test provodi kao dijagnostički test, on se izvodi na nižim naponima nego ispitivanja izdržavanja, i stoga se može smatrati nerazornim testom. Dijagnostičko ispitivanje omogućava određivanje relativne količine razgradnje kablovskog sustava i u usporedbi s prethodnim podacima ispitivanja, da li će kabelski sustav vjerojatno nastaviti pravilno obavljati svoju funkciju. Treba napomenuti da vrijednosti mjerenja dobivene tijekom VLF ispitivanja ne mogu biti u korelaciji s vrijednostima dobivenim tijekom ispitivanja frekvencije snage. Na primjer, ispitivanja PF i DF provode se na frekvenciji od 60 Hz koja je mnogo veća nego 0,1 Hz, a PD se može razlikovati u pogledu veličine i početnog napona. Kada je izolacija kablovskog sustava u naprednom stanju



razgradnje, VLF dijagnostički testovi mogu uzrokovati razgradnju kabela prije nego što se ispitivanje može prekinuti [14].

#### 4. BRODSKI ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

Brodski elektroenergetski sustav je najvažnija komponenta svakog broda iz razloga jer je odgovoran za stvaranje, distribuciju i kontrolu električne energije na brodu te omogućava rad svim ostalim podsustavima, strojevima i opremi koja se na njemu nalazi. Za početak potrebno je razumjeti kako električni sustav funkcionira. Snaga broda generira se pomoću glavnog pokretača što je najčešće dizel generator i alternatora koji rade zajedno. Za to se na brodu koristi generator izmjenične struje. Generator djeluje na principu da kada magnetsko polje oko vodiča varira, u vodiču se inducira struja. Generator se sastoji od stacionarnog skupa vodiča namotanih u zavojnice na željeznoj jezgri odnosno zovemo ga stator. Rotirajući magnet zvan rotor okreće se unutar ovog statora stvarajući magnetsko polje. Ovo polje prelazi preko vodiča, stvarajući induciranu elektro-magnetsku silu jer mehanički ulaz uzrokuje okretanje rotora. Nekoliko točaka koje treba napomenuti o snazi na brodu su sljedeće [16]:

- Izmjenična trofazna snaga preferira se nad istosmjernom jer daje više snage za istu veličinu.
- 3 faze se preferiraju u odnosu na jednu fazu jer povlače više snage, a u slučaju neuspjeha jedne faze, ostale 2 još uvijek mogu raditi.



Slika 21. Yanmar 6EY26LW dizel generator

Izvor: [https://www.yanmar.com/global/powergeneration/products/diesel\\_generators/6ey26lw/](https://www.yanmar.com/global/powergeneration/products/diesel_generators/6ey26lw/)

Snaga koja se stvara na brodu mora biti učinkovito distribuirana na cijelom brodu. Za to se koristi sustav distribucije energije broda. Brodski distribucijski sustav sastoji se od različitih komponenti za distribuciju i siguran rad sustava. Neke od tih komponenti su sljedeće [16]:

- Generator broda koji se sastoji od dizel motora i alternatora
- Glavna razvodna ploča koja je metalno kućište koje uzima snagu iz dizelskog generatora i isporučuje ga različitim strojevima.
- Prekidači koji djeluju u nesigurnom stanju i mogu zaustaviti sustav kako bi se izbjegli kvarovi i nesreće.
- Osigurači, kao sigurnosni uređaj za strojeve.
- Transformatori za pojačavanje ili spuštanje napona. Kad se treba opskrbiti sustav rasvjete, u distribucijskom sustavu koriste se za spuštanje napona.
- Sustav distribucije je trožilni (tri žice) i može se neutralno izolirati ili uzemljiti.
- Izolirani sustav je poželjniji u usporedbi s uzemljenim sustavom.

Svaka od komponenti koje čine cijeloukupni distribucijski sustav mora biti pravilno izolirana kako bi se osigurao integritet i pravilan rad sustava.

#### **4.1.KLASIFIKACIJSKA DRUŠTVA ZA ODREĐIVANJE PRAVILA I STANDARDA NA BRODOVIMA**

Brod izgrađen u skladu s pravilima i propisima društva članica ili u skladu s jednakim zahtjevima, i ispunjavanje primjenjivih zahtjeva za stabilnost bit će dodijeljena klasa u registarskoj knjizi društva. Za brodove u službi, svako društvo članica održava odredbe klase putem periodičnih posjeta svojih anketara brodu kako je definirano u njegovim pravilima i propisima kako bi se utvrdilo da li je brod trenutno u skladu s tim pravilima. Ako značajni nedostaci postanu očiti ili se zadrži šteta između relevantnih posjeta anketara, vlasnik i operater dužni su bez odlaganja obavijestiti dotično društvo. Slično tome, svaka izmjena koja bi utjecala na klasu mora dobiti prethodno odobrenje od strane klasifikacijskog društva. Kaže se da je brod u klasi kada su, prema mišljenju društva, pravila i propisi koji se na njega odnose zadovoljeni. Internacionalna klasifikacijska društva su sljedeća [17]:

- American Bureau of Shipping
- Bureau Veritas
- China Classification Society
- Det Norske Veritas
- Germanischer Lloyd

- Korean Register of Shipping
- Lloyd's Register of Shipping
- Nippon Kaiji Kyokai
- Registro Italiano Navale
- Russian Maritime Register of Shipping

Za klasifikaciju električnih sustava i izolacije zadužena je međunarodnaelektrotehnička komisija ili IEC. Međunarodna elektrotehnička komisija (IEC) daje preporuke za električne instalacije u brodovima svim nacionalnim tijelima, klasifikacijskim društvima i svima koji su uključeni u morsku industriju. Sve veće usvajanje ovih preporuka dovesti će do veće razine međunarodne standardizacije. IEC standardi široko su prihvaćeni kao osnova nacionalnih ili regionalnih elektrotehničkih standarda, a često se navode u specifikacijama proizvođača i od strane korisnika prilikom raspisivanja natječaja. Preko 2000 standarda pokriva gotovo svaku temu elektrotehnologije od akustike, medicinskih uređaja, izolacijskih materijala, zrakoplova pa sve do nuklearnih instrumenata [17].

Zadovoljavanje standarda potrebno je kako bi brod mogao ploviti i obavljati funkciju za koju je namijenjen. Međutim za sigurnost na brodu zadužena je međunarodna konvencija o sigurnosti života na moru odnosno SOLAS konvencija.

#### **4.1.1. SOLAS konvencija**

SOLAS konvencija u svojim uzastopnim oblicima općenito se smatra najvažnijim od svih međunarodnih ugovora koji se tiču sigurnosti trgovačkih brodova. Prva verzija usvojena je 1914. godine, kao odgovor na katastrofu na Titaniku, druga 1929., treća 1948., a četvrta 1960. godine. Verzija iz 1974. uključuje postupak prećutnog prihvaćanja - koji predviđa da izmjena i dopuna stupa na snagu određenog datuma, osim ako se prije tog datuma dobiju prigovori na amandman od dogovorenog broja stranaka. Kao rezultat toga, Konvencija iz 1974. godine u više je navrata ažurirana i dopunjena.

Glavni cilj SOLAS konvencije je odrediti minimalne standarde za izgradnju, opremu i rad brodova, kompatibilne s njihovom sigurnošću. Države zastave odgovorne su za osiguranje da brodovi pod njihovom zastavom ispunjavaju njihove zahtjeve, a u konvenciji je kao dokaz da je to učinjeno propisano nekoliko potvrda. Odredbe o kontroli također omogućavaju vladama ugovornicama da pregledaju brodove drugih država ugovornica ako postoje jasni razlozi za vjerovanje da brod i njegova oprema u biti ne udovoljavaju zahtjevima konvencija, ovaj postupak poznat je kao kontrola države luke. Trenutna konvencija SOLAS uključuje članke koji određuju opće obveze, postupak izmjena i slično, te su podijeljeni u 14 poglavlja [18]:

1. Izgradnja - Podjela i stabilnost, strojevi i električne instalacije
2. Zaštita od požara, otkrivanje požara i gašenje požara
3. Uređaji koji spašavaju život
4. Radiokomunikacije
5. Sigurnost navigacije
6. Prijevoz tereta
7. Prijevoz opasnog tereta
8. Nuklearni brodovi
9. Uprava za sigurno upravljanje brodovima
10. Mjere sigurnosti za plovila velike brzine
11. Posebne mjere za poboljšanje pomorske sigurnosti
12. Posebne mjere za jačanje pomorske zaštite
13. Dodatne sigurnosne mjere za prijevoz rasutih tereta
14. Mjere sigurnosti za brodove koji plove u polarnim vodama

U nastavku su objašnjena neka od najbitnijih poglavlja SOLAS konvencije.

#### ***4.1.1.1. Izgradnja – podjela i stabilnost, strojevi i električne instalacije***

Podjela putničkih brodova u vodonepropusne odjeljke mora biti takva da će nakon pretpostavljenog oštećenja broskog trupa plovilo ostati na površini i stabilno. Također su propisani zahtjevi za vodonepropusnost integriteta i crpljenje kaljuža za putničke brodove, kao i zahtjevi stabilnosti za putničke i teretne brodove. Stupanj potpodjeljenja mjeren najvećom dopuštenom udaljenošću između dvije susjedne pregrade varira od duljine broda i usluge u kojoj je angažiran. Najviši stupanj podjele odnosi se na putničke brodove. Zahtjevi koji se odnose na strojeve i električne instalacije dizajnirani su tako da osiguravaju održavanje usluga koje su ključne za sigurnost broda, putnika i posade u različitim izvanrednim uvjetima [18].

#### ***4.1.1.2. Zaštita od požara, otkrivanje požara i gašenje požara***

Ovo poglavlje uključuje detaljne odredbe o požarnoj sigurnosti za sve brodove i posebne mjere za putničke brodove, teretne brodove i tankere. Oni uključuju sljedeća načela: podjela broda na glavne i okomite zone toplinskim i strukturnim granicama, odvajanje smještajnih prostora od ostatka broda toplinskim i strukturnim granicama, ograničena uporaba zapaljivih materijala, otkrivanje bilo kakvog požara u zoni poddijetla, zadržavanje i gašenje bilo kakvog požara u prostoru poddijetla, zaštita sredstava za bijeg ili pristupa u svrhu gašenja požara, spremna dostupnost uređaja za gašenje požara, minimiziranje mogućnosti paljenja zapaljive teretne pare [18].

#### ***4.1.1.3. Uređaji za spašavanje života***

Poglavlje uključuje zahtjeve za spasilačke uređaje, uključujući zahtjeve za čamce za spašavanje, brodove za spašavanje i pojaseve za spašavanje prema vrsti broda. Međunarodni kodeks za spašavanje života (LSA) daje posebne tehničke zahtjeve za i obvezan je u skladu s Uredbom 34, u kojem se navodi da svi uređaji koji spašavaju život moraju biti u skladu s primjenjivim zahtjevima LSA kodeksa [18].

#### ***4.1.1.4. Radiokomunikacije***

Poglavlje uključuje Globalni sustav pomorske sigurnosti (GMDSS). Svi putnički brodovi i svi teretni brodovi od 300 bruto tonaže i više na međunarodnim putovanjima moraju nositi opremu namijenjenu poboljšanju šansi za spašavanje nakon nesreće, uključujući satelitski položaj za hitne slučajeve koji označava radio signale (EPIRB) i transpondere za traganje i spašavanje (SARTs) za mjesto broda ili plovila za spašavanje. Propisi u ovom poglavlju pokrivaju obveze vlada ugovornica da pružaju radiokomunikacijske usluge kao i brodske zahtjeve za prijevoz radiokomunikacijske opreme. Poglavlje je usko povezano s pravilnikom o radiju Međunarodne unije za telekomunikacije [18].

#### ***4.1.1.5. Sigurnost navigacije***

Ovo poglavlje identificira određene usluge sigurnosti plovidbe koje bi trebale pružati vlade ugovornice i utvrđuje odredbe operativne prirode koje se općenito primjenjuju na sve brodove na svim putovanjima. To je u suprotnost u odnosu s konvencijom u cjelini, koja se odnosi samo na određene klase brodova koji su angažirani na međunarodnim putovanjima. Obuhvaćene usluge uključuju održavanje meteoroloških službi za brodove, patrolna služba za led, rute brodova i održavanje službi za traganje i spašavanje. Također ovo poglavlje uključuje opću obvezu za zapovjednike da pomognu onima koji su u nevolji i da vlade ugovornice osiguraju da svi brodovi budu dovoljno i učinkovito upravljani iz sigurnosno gledišta. Uz sve navedene sigurnosne mjere vrlo je važno i prevoziti snimača podataka o putovanju (VDR) i automatskih sustava za identifikaciju broda (AIS) [18].

#### ***4.1.1.6. Prijevoz tereta***

Poglavlje prijevoz tereta pokriva sve vrste tereta (osim tekućina i plinova u rasutom stanju) koji zbog svojih posebnih opasnosti za brodove ili osobe na brodu mogu zahtijevati posebne mjere opreza. Propisi uključuju zahtjeve za skladištenje i osiguranje tereta ili teretnih jedinica (poput kontejnera). Poglavlje zahtijeva da teretni brodovi koji prevoze žito poštuju Međunarodni kodeks žitarica [18].

#### **4.1.1.7. Prijevoz opasnog tereta**

Poglavlje zahtijeva da prijevoz opasne robe bude u skladu s odgovarajućim odredbama Međunarodnog zakona o pomorskoj opasnoj robi (MMDG kodeks). Regulacije kod prijevoza opasnog tereta podijeljene su u 5 dijelova [18]:

- Dio A

Prijevoz zapakirane opasne robe uključuje odredbe o razvrstavanju, pakiranju, označavanju, dokumentaciji i skladištenju opasne robe. Od vlada ugovornica potrebno je izdati upute na nacionalnoj razini, a poglavlje obvezuje Međunarodni kodeks za pomorsku opasnu robu (IMDG) koji je razvio IMO, koja se stalno ažurira kako bi se prilagodila nova opasna roba i dopunjavale ili revidirale postojeće odredbe.

- Dio A1

Prijevoz opasne robe u čvrstom obliku skupno obuhvaća dokumentaciju, skladištenje i segregacijske zahtjeve za tu robu i zahtijeva prijavljivanje incidenata koji uključuju takvu robu.

- Dio B

Obuhvaća izgradnju i opremu brodova koji u rasutom stanju prevoze opasne tekuće kemikalije i zahtijeva da kemijski tankeri budu u skladu s Međunarodnim kemijskim bulk kodom (IBC kod).

- Dio C

Obuhvaća izgradnju i opremu brodova koji prevoze ukapljeni plin u rasutom stanju i nosačima plina kako bi udovoljili zahtjevima Međunarodnog kodeksa za prijevoz plina (IGC kod).

- Dio D

Uključuje posebne zahtjeve za prijevoz pakiranog ozračenog nuklearnog goriva, plutonij i radioaktivni otpad visoke razine na brodovima i zahtijeva da brodovi koji prevoze takve proizvode budu u skladu s Međunarodnim kodeksom za siguran prijevoz pakiranog ozračenog nuklearnog goriva, plutonija i visoko radioaktivnog otpada na brodovima.

#### **4.1.1.8. Nuklearni brodovi**

Daje osnovne zahtjeve za brodove na nuklearni pogon, a posebno se bavi opasnostima od zračenja. Odnosi se na detaljan i sveobuhvatan kodeks sigurnosti nuklearnih trgovačkih brodova koji je skupština IMO usvojila 1981. godine [18].

#### ***4.1.1.9. Uprava za sigurno upravljanje brodovima***

Poglavlje obvezuje kodeks međunarodnog upravljanja sigurnošću (ISM), koji zahtijeva da brod ili bilo koja osoba koja je preuzela odgovornost za brod uspostavi sustav upravljanja sigurnošću [18].

#### ***4.1.1.10. Mjere sigurnosti za plovila velike brzine***

Poglavlje obvezuje Međunarodni kodeks sigurnosti za brodove velike brzine (HSC kod) [18].

#### ***4.1.1.11. Posebne mjere za poboljšanje sigurnosti***

Poglavlje pojašnjava zahtjeve koji se odnose na autorizaciju priznatih organizacija (odgovornih za provođenje anketa i inspekcija ponašanja administracija), poboljšane ankete, shema identifikacijskog broja broda i nadzor države luke nad operativnim zahtjevima [18].

#### ***4.1.1.12. Posebne mjere za jačanje pomorske zaštite***

U ovom poglavlju se zahtijeva da se svim brodovima osigura sustav upozorenja o sigurnosti broda. Pokriva zahtjeve za lučke objekte, pružajući između ostalog vladama ugovornicama da osiguraju provođenje sigurnosne procjene lučkih objekata i da se sigurnosni planovi lučkih postrojenja razvijaju, provode i preispituju u skladu s ISPS kodeksom. Ostali propisi u ovom poglavlju obuhvaćaju pružanje informacija IMO-u, kontrolu brodova u luci (uključujući mjere poput kašnjenja, pritvora, ograničenje operacija, uključujući kretanje unutar luke ili izbacivanje broda iz luke), i posebna odgovornost tvrtki [18].

#### ***4.1.1.13. Dodatne sigurnosne mjere za prijevoz rasutog tereta***

Poglavlje uključuje strukturne zahtjeve za prijevoz rasutih tereta dužine preko 150 metara [18].

#### ***4.1.1.14. Mjere sigurnosti za brodove koji plove u polarnim vodama***

Poglavlje od 1. siječnja 2017. obvezuje uvod i dio I-A Međunarodnog kodeksa za brodove koji posluju u Polarnim vodama (polarni zakonik) [18].

## 4.2. SOLAS REGULACIJE ZA ELEKTRIČNE INSTALACIJE

Možemo izdvojiti 7 najbitnijih regulacija koje je potrebno zadovoljiti za sigurnu izolaciju komponenti i metalnih dijelova električnih instalacija [17].

1. Da bi se osigurala odgovarajuća indikacija i zaštita, propisi određuju da su svi izloženi metalni dijelovi električne instalacije, osim dijelova koji prenose struju učinkovito uzemljeni, ali postoje i sljedeći izuzetci:
  - a) Kape za svjetiljke, reflektori, pričvrtni vijci, kopče za kablove, fluorescentne kopče za svjetiljke itd., koji su na odgovarajući način zaklonjeni ili postavljeni tako da ne mogu postati živi ili doći u kontakt s uzemljenim metalom.
  - b) Oprema s potpuno izoliranom konstrukcijom u kojoj je izolacija koja ga obuhvaća trajna i uglavnom kontinuirana
  - c) Prijenosni uređaji s dvostrukom izolacijom ili pojačanom izolacijom u skladu s odobrenim standardima.
  - d) Oprema koja funkcionira na niskom naponu
2. Svi ostali metalni okviri ili kućišta električne opreme trebaju biti spojeni na trup izravno ili preko uzemljenog terminala utičnice. U tu svrhu ne treba se oslanjati samo na metalni kabelski omotač.
3. Metalni omotači kabela trebaju biti električno spojeni i uzemljeni pomoću kopča ili stezaljkama materijala otpornog na koroziju, uspostavljajući učinkovit kontakt s omotačem i uzemljenim metalom.
4. Svi spojevi u metalnim vodovima ili kanalima koji se koriste za uzemljenje trebaju biti čvrsto izrađeni i zaštićeni od korozije
5. Svi izloženi metalni radovi pričvršćeni na izolirane pregrade, glave palube itd. trebaju biti učinkovito vezani i uzemljeni (kako bi se spriječile razlike u potencijalu od postojećih).



6. Svi metalni dijelovi prijenosnih uređaja, osim dijelova za prijenos, trebaju biti učinkovito povezani s trupom broda. To se postiže povezivanjem u fleksibilnom kablu ili kablu kroz pridruženi utikač i utičnicu. Ponekad se karoserija stroja može spojiti na palubu golom, fleksibilnom, višenamjenskom, pocinčanom žicom.
7. Izbor napona za prijenosne uređaje. Uvjeti na brodovima uvelike se razlikuju i teško ih je definirati. Precizna pravila koja reguliraju primjenu odgovarajućih napona za prijenosnu opremu na raznim lokacijama na brodovima stoga nisu izvediva, no možemo ih podijeliti ovako:
  - a) Osjetljivost pojedine komponente također znatno varira. Dokazi pokazuju da u određenim uvjetima bilo koji izmjenični napon iznad 55 V može biti koban, ali uz pravilan odabir zaliha i opreme, rizici se mogu svesti na prihvatljivi minimum.
  - b) Treba uzeti u obzir i rizik od mogućih ozljeda i pada nakon nastanka strunog udara zbog neispravnog odabira napona.
  - c) Najgori uvjeti nastaju u strojarnicama i kotlovnicama, u dvostrukim dnima, ispod podnih ploča strojarnice i drugim uvjetima, posebno vlažnim, što dovodi do niskog otpora kontakta kože. Pod tim uvjetima opskrba po mogućnosti ne smije biti veća od 55 V za prijenosne alate i ručne svjetiljke. Ako se ne koriste prijenosni alati, preporučuje se 24 V za ručne svjetiljke. Ako je dovod svakog uređaja izveden iz zasebnog izolacijskog transformatora, sigurnosni faktor se dodatno poboljšava.
  - d) U nekim slučajevima može se koristiti opskrba koja ne prelazi 115 V dobivena od transformatora, srednja točka sekundarnog uzemljenja može se koristiti, to ograničava rizik od udara na najviše 60 V.
  - e) U smještajnim prostorima u kojima rizik nije čest faktor, uobičajena opskrba je zadovoljavajuća, npr. ventilatori kabine, stolne svjetiljke itd., pod uvjetom da je oprema zadovoljavajuće uzemljena. Ako je potrebno, mogu se koristiti transformatori s dvostrukom izolacijom.

## **5. NAPREDNE METODE ISPITIVANJA KVALITETE ELEKTRIČNE IZOLACIJE**

Unatoč mnogim standardnim metodama ispitivanja kvalitete električne izolacije postoje i napredne metode koje se također koriste ali ne toliko često. Napredne metode mogu se koristiti pojedinačno ili u kombinaciji za sveobuhvatnu procjenu električne izolacije na brodovima. Naravno redovito održavanje i ispitivanje od ključne su važnosti kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost brodskih električnih sustava, posebno u izazovnim uvjetima kao što su tijekom plovidbe. Jedna od najčešćih naprednih metoda ispitivanja izolacije je termalna inspekcija odnosno inspekcija termalnim kamerama [19].

### **5.1. TERMOGRAFIJA**

Toplinsko snimanje, poznato i kao termografija ili infracrveno (IR) snimanje je vrijedan alat za pregled električne izolacije i identificiranje mogućih problema. Toplinske snimke otkrivaju i vizualiziraju temperaturne razlike, omogućujući prepoznavanje žarišta, pregrijavanja i potencijalnih električnih problema u električnim sustavima i izolaciji. Ozbiljnost kvara kategorizirana je time koliko se trenutna temperatura povećava iznad referentne temperature ili usporedivog mjesta pod istim opterećenjem. Kako se temperaturna razlika povećava, tako se povećavaju i troškovi energije i popravka i opasnost od požara. Električni sustavi izuzetno su snažni i trebaju rutinske inspekcije kako bi se osigurala pouzdanost, smanjili troškovi održavanja i održala sigurnost. S većim objektima postoji veći rizik od katastrofalnih kvarova, što rezultira požarnom štetom koja možečiji popravak može skupo koštati. Termalnom kamerom može se pronaći i riješiti ove probleme na siguran i isplativ način.



Slika 22. Izgled i djelovi termalne kamere

Izvor: <https://professional-electrician.com/features/advantages-of-using-thermal-cameras-to-find-electrical-faults-hikmicro/>

Bez tehnologije toplinskog snimanja, traženje električnih grešaka zahtijeva izravan kontakt ili praktično testiranje. Termografija omogućuje terenskim profesionalcima da se ispitivanja obave sa sigurne udaljenosti. Iako se neki ormari i oprema možda još trebaju otvoriti kako bi se osigurala vidna linija za mjerenja, sami toplinski fotoaparati ne zahtijevaju izravan kontakt. Toplinske kamere također ne zahtijevaju potpuno gašenje porizvodnje električne energije i barem je djelomično opterećenje potrebno za mjerenje bilo kakvih odstupanja topline koja ukazuju na električnu grešku. Zbog toga termografija smanjuje potencijalne gubitke zbog prekida proizvodnje ili usluge tijekom inspekcije. Evo kako se toplinsko snimanje koristi za pregled električne izolacije [19]:

### 1. Otkrivanje točaka pregrijavanja

- Električne komponente i priključci koji ne rade ispravno mogu stvoriti višak topline zbog faktora poput labavih priključaka, preopterećenja ili kvara izolacije. Toplinska kamera može brzo otkriti žarišta koja se pojavljuju kao područja povišene temperature. Ove žarišta mogu ukazivati na probleme s izolacijom ili drugim električnim komponentama.

### 2. Spriječavanje požara i kvarova

- Pregrijavanje unutar električnog sustava čest je uzrok požara i kvarova opreme. Redovni toplinski pregledi mogu pomoći u ranom prepoznavanju potencijalnih problema, omogućujući preventivno održavanje prije katastrofalnog kvara.

### 3. Kontroliranje distribucije energije

- Toplinsko snimanje može se koristiti za procjenu raspodjele električnih opterećenja unutar sustava. Neravnoteže u raspodjeli opterećenja mogu dovesti do lokaliziranog pregrijavanja, što je često pokazatelj problema s izolacijom.

### 4. Kontrola kvalitete energije

- Toplinsko snimanje može se koristiti tijekom procesa proizvodnje električnih komponenti i sustava kako bi se osiguralo da su priključci i izolacija pravilno ugrađeni i funkcioniraju kako je predviđeno.

### 5. Otkrivanje loših spojeva

- Labavi električni priključci mogu stvoriti otpor i toplinu. Toplinsko snimanje može utvrditi labave spojeve koji možda nisu vidljivi vizualno tijekom redovnog pregleda.

### 6. Otkrivanje problema sa izolacijom

- Iako termalno snimanje ne može izravno vidjeti izolaciju, može otkriti učinke problema izolacije, poput prodora vlage, raspada izolacije ili razgradnje. Ove značajke mogu dovesti do neravne raspodjele temperature na površini električnih komponenti.

## 7. Prediktivno održavanje

- Redovito provodeći toplinske preglede, timovi za održavanje mogu prepoznati i riješiti potencijalne probleme prije nego što eskaliraju, produžujući životni vijek električnih sustava i smanjujući zastoj.

## 8. Sigurnost

- Toplinsko snimanje omogućava tehničarima da pregledaju električne sustave bez fizičkog kontakta, smanjujući rizik od električnih nesreća i poboljšavajući sigurnost tijekom inspekcije.

Ključ korištenja toplinskih kamera za pregled električnih sustava je točno mjerenje temperature i usporedba. Samo usporedba će vam dati dobru predstavu o područjima koja ćete dalje pregledati, a mjerenja će vam omogućiti da klasificirate ozbiljnost kvara. Da bi se odredila ozbiljnost, korisnik će usporediti mjerenja iz predmetne komponente sa sličnim mjerenjima pod istim opterećenjem. Većina standarda za termičku inspekciju uključuje podatke o prihvatljivim ograničenjima, sigurnosne protokole i druge zahtjeve za osiguravanje pouzdanosti. Iako toplinske kamere ne mogu u potpunosti zamijeniti potrebu za vizualnim i kontaktnim pregledima, mogu vam pomoći u određivanju gdje su u sustavu ove vrste inspekcija opravdane [19].

## 6. BUDUĆNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Budućnost elektroenergetskih sustava na brodovima prolazi kroz značajnu transformaciju vođenu napretkom u tehnologiji, ekološkim propisima i težnjom pomorske industrije za održivošću i učinkovitošću. Snažna potreba za čistijim, učinkovitijim i tehnološki naprednijim pomorskim prijevozom dovodi do velikih istraživanja i mogućim pronalaskom boljih rješenja za sustave na brodu. Dok se svijet suočava s brigom za okoliš i strogim propisima o emisijama, električni sustavi pojavljuju se kao odlično rješenje za pomorsku industriju. Električni pogonski sustavi pogonjeni baterijama, vodikovim gorivnim ćelijama ili kombinacijom izvora energije, na čelu su ove pomorske revolucije. Ključne prednosti električnih sustava na brodu su:

### 1. Smanjenje emisija

- Električni sustavi proizvode minimalne ili nulte emisije na mjestu uporabe, značajno pridonoseći naporima pomorskog sektora da smanji svoj ugljični otisak i u skladu s međunarodnim propisima o okolišu.

## 2. Energetska učinkovitost

- Električni pogon je sam po sebi energetska učinkovitiji od tradicionalnih motora s unutarnjim izgaranjem. Omogućuje bolju kontrolu raspodjele energije, smanjenje otpada i optimizaciju potrošnje goriva.

## 3. Tehnološka integracija

- Električni elektroenergetski sustavi neprimjetno se integriraju s modernim digitalnim tehnologijama i automatizacijom, omogućujući precizno upravljanje, praćenje u stvarnom vremenu i prediktivno održavanje kako bi se poboljšale ukupne performanse plovila.

## 4. Hibridna rješenja

- Mnogi brodovi kombiniraju hibridna rješenja snage, kombinirajući tradicionalni i električni pogon radi veće učinkovitosti i fleksibilnosti u radu. Ovi hibridni sustavi posebno su učinkoviti tijekom situacija s malim opterećenjem ili manevriranjem.

Naravno uz sve ove prednosti, brodske luke također moraju unaprijediti svoju infrastrukturu. Luke ulažu u električnu infrastrukturu za punjenje goriva, što brodovima postaje sve pogodnije za prihvaćanje elektroenergetskih sustava.

Svaki budući napredak traži i bolja rješenja električne izolacije. Kontinuirano istraživanje znanosti o materijalima vjerojatno će dovesti do razvoja učinkovitijih i trajnijih izolacijskih materijala. Polimeri visokih performansi, nanokompoziti i izolacijski premazi s superiornim toplinskim, električnim i mehaničkim svojstvima mogu zamijeniti tradicionalne materijale poput PVC-a i gume. Isto tako brodovi s naprednim pogonskim sustavima, poput plinskih turbina, mogu zahtijevati poboljšanu toplinsku izolaciju kako bi izdržali veće radne temperature. Razvoj toplinskih izolacijskih materijala koji mogu podnijeti ekstremnu toplinu uz održavanje sigurnosti i energetske učinkovitosti bit će od iznimne važnosti.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu obrađene su vrste i metode ispitivanja električne izolacije kao i svojstva dielektrika i materijala koji se koriste za izoliranje komponenti i samog sustava, te isto tako osnovne funkcije elektroenergetskog sustava i dijelova za proizvodnju energije. Ispitivanje električne izolacije presudan je i neophodan zadatak osiguranja sigurnosti, pouzdanosti i performansi električnih sustava i opreme. Bilo da se radi o brodovima, industrijskim strojevima ili električnoj infrastrukturi, kvaliteta izolacije igra ključnu ulogu u sprečavanju električnih grešaka, požara i neispravnosti. Kroz različite metode ispitivanja, kao što su ispitivanja dielektrične čvrstoće, mjerenja otpornosti na izolaciju i toplinska analiza, možemo procijeniti cjelovitost izolacijskih materijala i identificirati potencijalne slabosti ili nepravilnosti. Dobar pristup kontroli kvalitete ne samo da štiti ljudske živote i imovinu, već i minimizira skupe stanke i popravke. Kako tehnologija napreduje, tako i metode i alati za ispitivanje izolacije omogućuju preciznije i učinkovitije procjene. Uz to, s rastućim naglaskom na održivosti i energetske učinkovitosti, razvoj ekoloških izolacijskih materijala i prakse ispitivanja postaju sve važniji. Dakle, kvaliteta električne izolacije je okosnica električne sigurnosti i pouzdanosti sustava, osiguravajući da naš moderni svijet ostane pogonjen, povezan i siguran. Stoga su kontinuirana istraživanja, inovacije i pridržavanje industrijskih standarda ključni u potrazi za superiornom električnom izolacijom i stalnim napretkom elektrotehnike.

## LITERATURA

- [1] <https://www.hseblog.com/the-importance-of-and-types-of-electrical-insulation/>
- [2] Malik, N.H., Al-Arainy, A.A. & Qureshi, M.I., c1998. *Electrical insulation in power systems*, New York: Marcel Dekker.
- [3] <https://wiki.testguy.net/t/insulating-liquids-basic-properties-types-and-applications-explained/68>
- [4] [https://www.brainkart.com/article/Breakdown-in-Liquid-Dielectrics\\_12890/](https://www.brainkart.com/article/Breakdown-in-Liquid-Dielectrics_12890/)
- [5] Ravindra Arora; Wolfgang Mosch, "Electrical Properties of Vacuum as High Voltage Insulation," in *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, IEEE, 2011, pp.249-273, doi: 10.1002/9780470947906.ch5.
- [6] <https://www.eeeguide.com/vacuum-insulation/>
- [7] <https://www.inmr.com/hybrid-insulators-for-distribution-lines/>
- [8] [https://electricalvoice.com/solid-insulating-materials/?utm\\_content=cmp-true](https://electricalvoice.com/solid-insulating-materials/?utm_content=cmp-true)
- [9] [https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm\\_content=cmp-true](https://www.electrical4u.com/dielectric-properties-of-insulation/?utm_content=cmp-true)
- [10] <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/dielectric-constant>
- [11] <https://www.toppr.com/guides/physics/electrostatic-potential-and-capacitance/dielectrics-and-polarization/>
- [12] <https://www.eeeguide.com/electrical-and-electronics-engineering-articles/applications-of-insulating-materials/>
- [13] <https://electengmaterials.com/classes-of-insulating-materials/>
- [14] Gill, Paul. "Electrical Power Equipment Maintenance and Testing." *Power Engineering (Willis)* (2016): 587–702. Web.
- [15] *Diagnostic Testing and Monitoring of Rotating Machines Brochure*, OMICRON, 01 2022
- [16] <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/how-is-power-generated-and-supplied-on-a-ship/>
- [17] *Marine Electrical Technology Fifth Edition* By Elstan A. Fernandez, February 2010, Shroff Publishers & Distributors Pvt. Ltd.
- [18] [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)
- [19] <https://professional-electrician.com/features/advantages-of-using-thermal-cameras-to-find-electrical-faults-hikmicro/>



## POPIS SLIKA

str.

Slika 1. Plinom izolirani kabel ispunjen sumpornim heksafluridom .....	6
Slika 2. Dielektrična čvrstoća nekih tekućina .....	7
Slika 3. Dielektrična svojstva tekućina .....	8
Slika 4. Hibridni izolator za distribijske stanice.....	11
Slika 5. Vrijednosti dielektrične čvrstoće nekih materijala.....	16
Slika 6. Vrijednosti dielektrične konstante za određene materijale .....	17
Slika 7. Struja punjenja u odnosu na primjenjeni napon.....	18
Slika 8. Struja istjecanja u odnosu na primjenjeni napon.....	18
Slika 9. Strujni krug s otporom i kapacitetom te pripadajućim strujama u paralelnom spoju .	19
Slika 10. Polarizacijski proces .....	20
Slika 11. Izolacija transformatora i namotaja.....	22
Slika 12. Glavni dijelovi SF6 prekidača.....	23
Slika 13. PVC izolacija kabela .....	26
Slika 14. Način mjerenja faktora disipacije, faktora snage i kapaciteta.....	31
Slika 15. Off-line metoda mjerenja djelomičnog pražnjenja .....	32
Slika 16. On-line metoda mjerenja djelomičnog pražnjenja .....	33
Slika 17. Postupak mjerenja izolacijskog otpora, indeksa polarizacije i dielektričnog apsorpcijskog omjera.....	34
Slika 18. Prikaz mjerenja istosmjernog otpora.....	35
Slika 19. Ispitivanje otpora izolacije kabela.....	36
Slika 20. Vrijednosti dielektrične konstante nekih izolacijskih materijala .....	38
Slika 21. Yanmar 6EY26LW dizel generator .....	39
Slika 22. Izgled i dijelovi termalne kamere.....	49

## POPIS TABLICA

str.

Tablica 1. Vrijednosti vakuuma ..... **Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.**