

# DIMENZIONIRANJE PRENAPONSKE ZAŠTITE TRANSFORMATORSKIH STANICA TS 110/20 kV

---

**Slišković, Goran**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:354336>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**DIMENZIONIRANJE PRENAPONSKE ZAŠTITE TRANSFORMATORSKIH  
STANICA TS 110/20 kV**

Rijeka, rujan 2022.

Goran Slišković

0069076376

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**DIMENZIONIRANJE PRENAPONSKE ZAŠTITE TRANSFORMATORSKIH  
STANICA TS 110/20 kV**

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2022.

Goran Slišković

0069076376

Rijeka, 19. ožujka 2022.

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

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Goran Slišković (0069076376)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **DIMENZIONIRANJE PRENAPONSKE ZAŠTITE TRANSFORMATORSKIH  
STANICA TS 110/20 kV / DIMENSIONING OF OVERVOLTAGE PROTECTION  
OF 110/20 kV TRANSFORMER STATIONS**

### Opis zadatka:

Tehnološke izvedbe, struktura, elementi i tehnički parametri transformatorskih stanica TS 110/20 kV. Utvrđivanje razine naponskih i prenaponskih naprezanja. Odabir i dimenzioniranje elemenata za prenaponsku zaštitu. Modeliranje postrojenja i proračun učinkovitosti prenaponske zaštite.

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

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

Prof. dr. sc. Viktor Sučić

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADBI RADA

Ovom izjavom potvrđujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim tokom studija uz pomoć mentora i služeći se navedenom literaturom.



---

Goran Slišković

# SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	3
1. UVOD.....	1
2. TRANSFORMATORSKA STANICA 110/20kV.....	2
1.1. Postrojenje 110 kV.....	2
2.1.2. Energetski transformatori.....	3
2.1.3. Prekidači.....	5
2.1.4. Rastavljači.....	6
2.1.5. Ostala oprema.....	6
2.2. Postrojenje 20 kV.....	8
2.2.1. Sklopni blokovi.....	8
2.2.2. Osnovna oprema 20 kV postrojenja.....	9
3. ODVODNICI PRENAPONA.....	11
3.1. Općenito o odvodnicima prenapona.....	11
3.2. Metal oksidni odvodnici prenapona.....	12
4. ALGORITAM ODABIRA ODVODNIKA PRENAPONA.....	16
4.1. Izbor trajnog radnog napona <b><i>U<sub>c</sub></i></b> i nazivnog napona odvodnika <b><i>U<sub>r</sub></i></b> .....	18
4.2. Izbor nazivne odvodne struje odvodnika prenapona <b><i>I<sub>n</sub></i></b> .....	22
4.3. Provjera zaštitnih razina odvodnika prenapona.....	22
4.4. Određivanje klase rasterećenja voda i određivanje energetske podesivosti voda.....	23
4.5. Izbor kućišta odvodnika prenapona.....	25
4.6. Provjera zone šticećenja odvodnika prenapona.....	27
5. ODABIR ODVODNIKA PRENAPONA ZA ZAŠTITU POSTROJENJA 110 kV.....	29
5.1. Izbor trajnog radnog napona <b><i>U<sub>c</sub></i></b> i nazivnog napona odvodnika <b><i>U<sub>r</sub></i></b> .....	29
5.2. Izbor nazivne odvodne struje odvodnika prenapona <b><i>I<sub>n</sub></i></b> .....	35
5.3. Provjera zaštitnih razina odvodnika prenapona.....	35
5.4. Određivanje klase rasterećenja voda i određivanje energetske podesivosti voda.....	36
5.5. Izbor kućišta odvodnika prenapona.....	38
5.6. Izračun zone šticećenja odvodnika prenapona.....	41
6. ODABIR ODVODNIKA PRENAPONA ZA ZAŠTITU 20 kV POSTROJENJA.....	43
6.1. Izbor trajnog radnog napona <b><i>U<sub>c</sub></i></b> i nazivnog napona odvodnika <b><i>U<sub>r</sub></i></b> .....	43
6.2. Izbor nazivne odvodne struje odvodnika prenapona <b><i>I<sub>n</sub></i></b> .....	45
6.3. Provjera zaštitnih razina odvodnika prenapona.....	45

6.4. Određivanje klase rasterećenja voda i određivanje energetske podesivosti voda.....	46
6.5. Izbor kućišta odvodnika prenapona .....	46
6.6. Izračun zone štíćenja odvodnika prenapona.....	50
7. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
POPIS SLIKA .....	53
POPIS TABLICA.....	54

## 1. UVOD

Uređaji za zaštitu od munje dolaze iz sredine 1700-ih. Rana tehnologija, kao što je gromobran, izvorno je pružala zaštitu za domove, prije nego što je prilagođena za korištenje na telekomunikacijskim i električnim mrežama. Kako se električna mreža razvijala, inženjeri su shvatili da je potreban novi uređaj za zaštitu visokonaponske opreme. Rani uređaji, kao što je elektrolitski odvodnik, uvedeni su početkom 20. stoljeća kako bi zadovoljili rastuće potrebe za zaštitom elektroenergetskog sustava. Tehnologija relativno kratkog vijeka uvedena je tijekom sljedećih dvadeset godina, sve do uvođenja tehnologije silicij karbida (SiC) 1926. godine. Prvi metal oksidni odvodnik prenapona predstavljen je 1976. Metal oksidni odvodnik prenapona štiti opremu od prenapona ili prijelaznih napona u elektroenergetskim sustavima, koji nastaju kao posljedica munje ili prenapona. Kada god se u sustavu zaštita od prenapona smatra potrebnom, odvodnici prenapona mogu biti instalirani na ili blizu opreme. Ne samo da odvodi dodatni napon u žicu za uzemljenje, već također omogućuje normalnom naponu da nastavi svoj put.

Upotreba, odnosno algoritam izbora jednog takvog odvodnika opisana je korak po korak u ovom radu na primjeru zaštite jedne transformatorske stanice 110/20 kV. Prije samog algoritma, ukratko će biti opisano 20 kV i 110 kV postrojenje, te će se nešto reći o metal oksidnim odvodnicima općenito. Opisana metoda izbora odvodnika prenapona za oba postrojenja temelji se na ABB-ovim preporukama te su korišteni ABB-ovi katalozi pri određivanju potrebnih veličina za proračun i određivanju samog tipa odvodnika prenapona.



## **2. TRANSFORMATORSKA STANICA 110/20kV**

Transformatorske stranice 110/20 kV razlikujemo:

- prema izvedbi: sa vanjskim postrojenjem 110 kV i unutarnjim srednjenaponskim postrojenjem, sa unutarnjim postrojenjem 110 kV i unutarnjim srednjenaponskim postrojenjem
- prema tehnološkoj izvedbi 110 kV postrojenja: postrojenje (vanjsko) s pojedinačnim elementima zrakom izoliranim, metal-oklopljeno plinom izolirano 110 kV postrojenje (unutarnje), hibridno (zrak-SF6) vanjsko postrojenje
- prema broju transformatora: trafostanice s 1,2, ili 3 transformatora
- prema snazi transformatora: 10,20,40,63 MVA za distribucijske mreže

Daljnji opis postrojenja 100 i 20 kV kao i određivanje zaštite provodi se za transformatorsku stanicu 110/20 kV s tri transformatora.

### **1.1. Postrojenje 110 kV**

Rasklopno postrojenje 110 kV izvedeno je s jednostrukim cijevnim sabirnicama uzdužno sekcioniranim s dva sekcijaska rastavljača, dva vodna polja 110 kV, tri transformatorska polja 110 kV i sekcijaskim poljem 110 kV.

Tablica 2.2.1. Nazivni parametri postrojenja 110 kV [3]

OZNAKA	NAZIV	MJERNA JEDINICA	VRIJEDNOST
$U_n$	Nazivni linijski napon	$kV_{rms}$	110
$U_m$	Najviši pogonski linijski napon	$kV_{rms}$	123
$U_{pf}$	Najviši podnosivi napon pogonske frekvencije, 1 min	$kV_{rms}$	230
$U_{peak}$	Najviši podnosivi udarni napon	$kV_{peak}$	550
$f$	Nazivna pogonska frekvencija	$Hz$	50
$I_{nS}$	Nazivna trajna struja sabirnica i sekcijskog polja	$A_{rms}$	2000
$I_{nV}$	Nazivna trajna struja dalekovodnih polja	$A_{rms}$	600
$I_{nT}$	Nazivna trajna struja transformatorskih polja	$A_{rms}$	300
$I_{ks}$	Struja kratkog spoja (1 s)	$kA$	31.5
$U_{pom(AC)}$	Pomoćni napon (AC)	$V$	400
$U_{pom(DC)}$	Pomoćni napon (DC)	$V$	220
$U_{pom(DC)}$	Pomoćni napon (DC)	$V$	48
	Minimalna klizna staza	$mm$	3075

### 2.1.2. Energetski transformatori

Koristi se energetski transformator 110/20 kV 40 MVA, a nakon što potrošnja konzuma poraste ugraditi će se energetski transformator 110/20 kV, 63 MVA. Energetski transformatori trebaju biti proizvedeni u skladu s HRN EN 600076. U sljedećim tablicama su prikazane osnovne tehničke karakteristike transformatora.

Tablica 2.2.2. Nazivni parametri transformatora 40 MVA [3]

Izvedba	Trofazni dvonamotni, uljni, regulacijski
Nazivna snaga	40 MVA
Nazivna frekvencija	50 Hz
Prijenosni omjer praznog hoda	110 kV $\pm$ 10x1.5%/21(10.5) kV
Grupa spoja	YNyn0 (d5)
Izolacija namotra nul-točke	
VN strana	Izolacija za puni napon
NN strana	Izolacija za puni napon

Metoda hlađenja	ONAN do $0.6S_n$ ONAF od $0.6S_n$
Uvjeti okoline	
Najviša temperatura	40°C
Najniža temperatura	-25°C
Srednja dnevna temperatura	30°C
Godišnja temperatura (prosječna)	20°C
Naponi praznog hoda	
VN strana	110 kV
NN strana	21 kV
NN strana – stabilizacijski napon	10.5 kV
Regulacija napona	Pod teretom na VN strani
Opseg regulacije	±15%
Napon kratkog spoja VN-NN	11% s tolerancijom ±7.5%
Izolacija namota na VN i NN strani	Jednolika
Priključci	
VN strana	Kondenzatorski provodnici ulje-zrak
NN strana	Konektorski priključak CONNEX
Gubici praznog hoda za nazivni napon i nazivnu frekvenciju	≤ 29 kW
Gubici opterećenja kod 75°C za nazivnu snagu i nazivni napon	≤ 156 kW
Gubici pomoćnih uređaja	≤ 2 kW
Zagrijavanje namota i ulja	65 K i 60 K
Ukupna masa	58400 kg

Tablica 2.2.3. Nazivni parametri transformatora 63 MVA [3]

Izvedba	Trofazni dvonamotni, uljni, regulacijski
Nazivna snaga	63 MVA
Nazivna frekvencija	50 Hz
Prijenosni omjer u praznom hodu	110 kV ± 10x1.5%/21(10.5) kV
Grupa spoja	YNyn0 (d5)
Izolacija namota nul-točke	
VN strana	Izolacija za puni napon
NN strana	Izolacija za puni napon
Metoda hlađenja	ONAN do $0.6S_n$ ONAF od $0.6S_n$
Uvjeti okoline	
Najviša temperatura	40°C
Najniža temperatura	-25°C
Srednja dnevna temperatura	30°C
Godišnja temperatura (prosječna)	20°C
Naponi praznog hoda	
VN strana	110 kV
NN strana	21 kV
NN strana – stabilizacijski napon	10.5 kV

Regulacija napona	Pod teretom na VN strani
Opseg regulacije	$\pm 15\%$
Napon kratkog spoja VN-NN	15% s tolerancijom $\pm 7.5\%$
Izolacija namota na VN i NN strani	Jednolika
Priključci VN strana NN strana	Kondenzatorski provodnici ulje-zrak Konektorski priključak CONNEX
Gubici praznog hoda za nazivni napon i nazivnu frekvenciju	$\leq 40$ kW
Gubici opterećenja kod 75°C za nazivnu snagu i nazivni napon	$\leq 230$ kW
Gubici pomoćnih uređaja	$\leq 2$ kW
Zagrijavanje namota i ulja	65 K i 60 K
Ukupna masa	73700 kg

Uz transformatore koristi se i popratna oprema kao što je regulacijska sklopka, Buchholzov relej, kontaktni termometar, odušnik, sušionik zraka, ventilatori, separator, uređaj za neispravnost separatora, strujni transformator termoslike na 1V provodniku i 1N provodniku.

### 2.1.3. Prekidači

Upotrebljavaju se prekidači s gašenjem luka u SF6 tehnici, za vanjsku montažu s jednim prekidnim mjestom po polu. Nazivni napon im je 123 kV, nazivna struja 2000 A, nazivna kratkospojna prekidna moć 40 kA i stupanj izolacije 123 Si 230/550. Pogon prekidača je motorno-opružni. Prekidači u trafo polju su trolejno upravljivi (s jednim pogonskim mehanizmom za sva tri pola), dok su u vodnim poljima jednopolno upravljivi prekidači (s jednim pogonskim mehanizmom po svakom polu). Prekidači imaju ugrađen brojač prorade i imaju tri svitka za isključenje. Također imaju servisna tipkala za uklop i isklop te kontrolu rada grijača s dojavom kvara u njihovom krugu, a i mogućnost ručnog navijanja i opuštanja opruge.

#### 2.1.4. Rastavljači

Koriste se navedeni rastavljači:

- trolni sabirnički rastavljači bez noževa za uzemljenje i smještajem polova u paraleli - u transformatorskim i vodnim poljima 110 kV
- trolni vodni rastavljači sa noževima za uzemljenje i smještajem polova u paraleli - u vodnim poljima 110 kV
- trolni sekcijski rastavljači sa noževima za uzemljenje i smještajem polova u paraleli

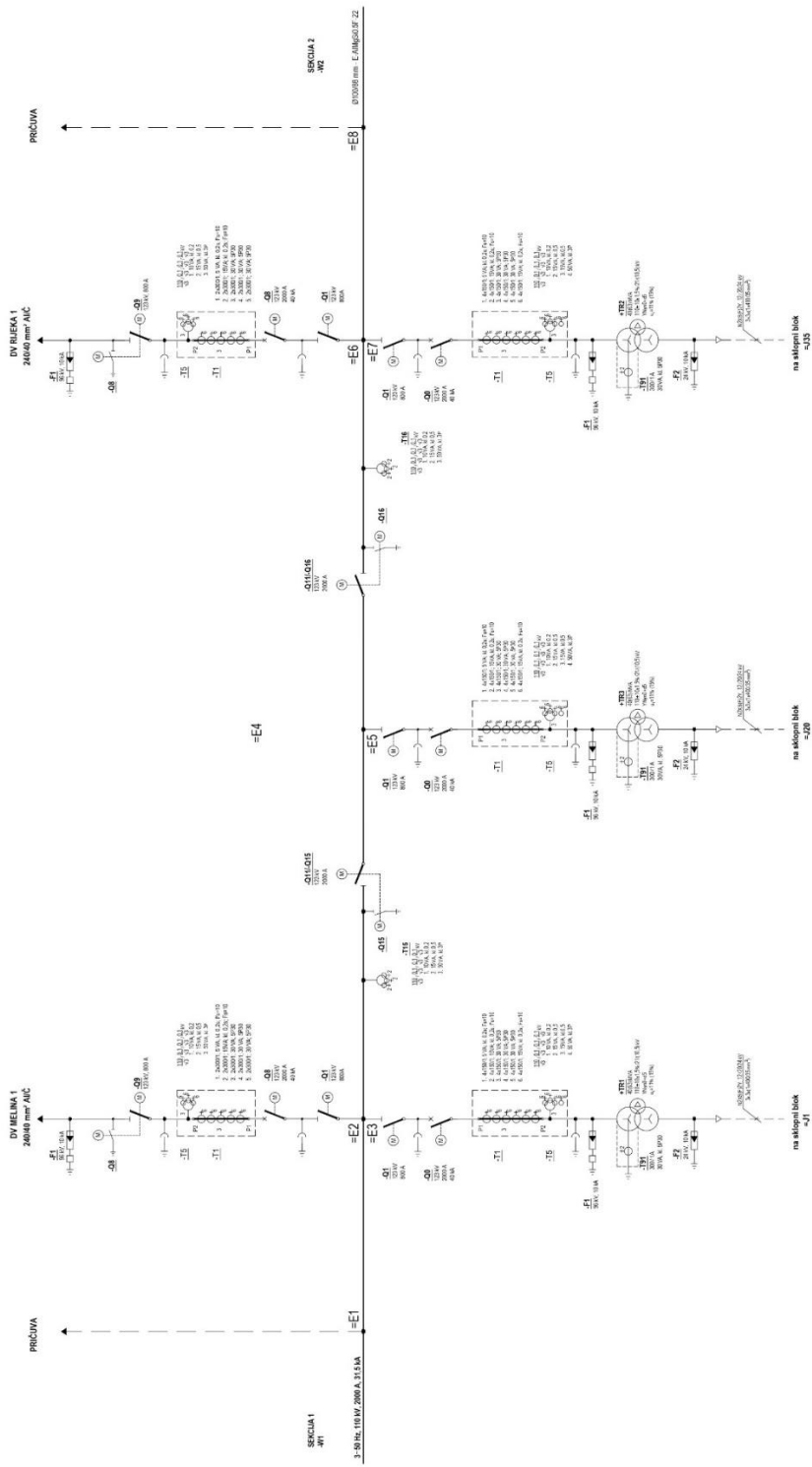
Svi rastavljači su zakretni, s dva odvojena kraka, za vanjsku montažu i keramičkih izolatora. Pogon rastavljača je elektromotorni opremljen servisnim tipkalima za upravljanje. Pogon noževa za uzemljenje je također elektromotorni, opremljen elektromehaničkom blokadom i servisnim tipkalima za upravljanje. Rastavljač s noževima za uzemljenje ima mehaničku blokadu izvan pogona, na pogonskoj motki. Rastavljači moraju biti u skladu s HRN EN 62271-1 i HRN EN 62271-102.

#### 2.1.5. Ostala oprema

U vodnim i transformatorskim poljima su predviđeni kombinirani mjerni transformatori, a u dvije sekcije naponski mjerni transformator za mjerenje napona u srednjoj fazi.

Odvodnici prenapona se ugrađuju u transformatorska polja 110 kV, a postavljaju se uz same energetske transformatore što bliže provodnim izolatorima primara transformatora. Ugrađuju se metal oksidni odvodnici prenapona za vanjsku montažu, visoke moći odvođenja uz najveću sigurnost gašenja, konstantnog zaštitnog nivoa i kod čestog pražnjenja, neosjetljivi na vlagu i zaštićeni od eksplozije.

Cijevne sabirnice su izvedene pomoću cijevi iz aluminijske legure. U svaku cijev se uvlači antivibracijsko uže Al 400 mm<sup>2</sup> u duljini 2/3 duljine cijevi.



Slika 2.1. Jednopolna shema 110 kV [3]

## 2.2. Postrojenje 20 kV

Spoj između 20 kV strane energetskog transformatora i 20 kV transformatorskih polja je izveden srednjenaponskim kabelima N2XS(F)2Y, 12/20/24 kV, 3x3x1x500/35 mm<sup>2</sup>.

Postrojenje 20 kV sastoji se od sljedećih karakterističnih polja i opreme:

- transformatorska polja: jednostruke sabirnice, prekidač, strujni mjerni transformator, naponski mjerni transformator, srednjenaponski osigurači, zemljospojnik, ormarić sekundarne opreme
- vodnja polja: jednostruke sabirnice, prekidač, strujni mjerni transformator, zemljospojnik, ormar sekundarne opreme
- polja kućnog transformatora: ormarić sekundarne opreme, strujni mjerni transformator, jednostruke sabirnice, prekidač, zemljospojnik,
- mjerno-sekcijska polja: zemljospojnik, naponski mjerni transformator, ormarić sekundarne opreme, jednostruke sabirnice, osigurač
- sekcijska polja: ormarić sekundarne opreme, jednostruke sabirnice, strujni mjerni transformator, prekidač, zemljospojnik,
- polja kompenzacije struje zemljospoja: jednostruke sabirnice, strujni mjerni transformator, ormarić sekundarne opreme, prekidač, , zemljospojnik

### 2.2.1. Sklopni blokovi

Postrojenje 20 kV bit će riješeno ugradnjom tvornički izrađenih metalom oklopljenih sklopnih blokova tip BVK-24, “Končar – Sklopna postrojenja d.d.” s izvlačivim vakuumskim prekidačima i sabirnicama koje su izolirane. Korišteni sklopni blokovi su metalom oklopljeni i odvojeni metalnim pragovima, te imaju visoku raspoloživost i pouzdanost u pogonu, što osigurava veliku sigurnost osoblja u pogonu. Kućište bloka sastoji se od 4 dijela: ormarić za smještaj sekundarne opreme, sabirnički odjeljak, priključni odjeljak i aparatni dio.

### 2.2.2. Osnovna oprema 20 kV postrojenja

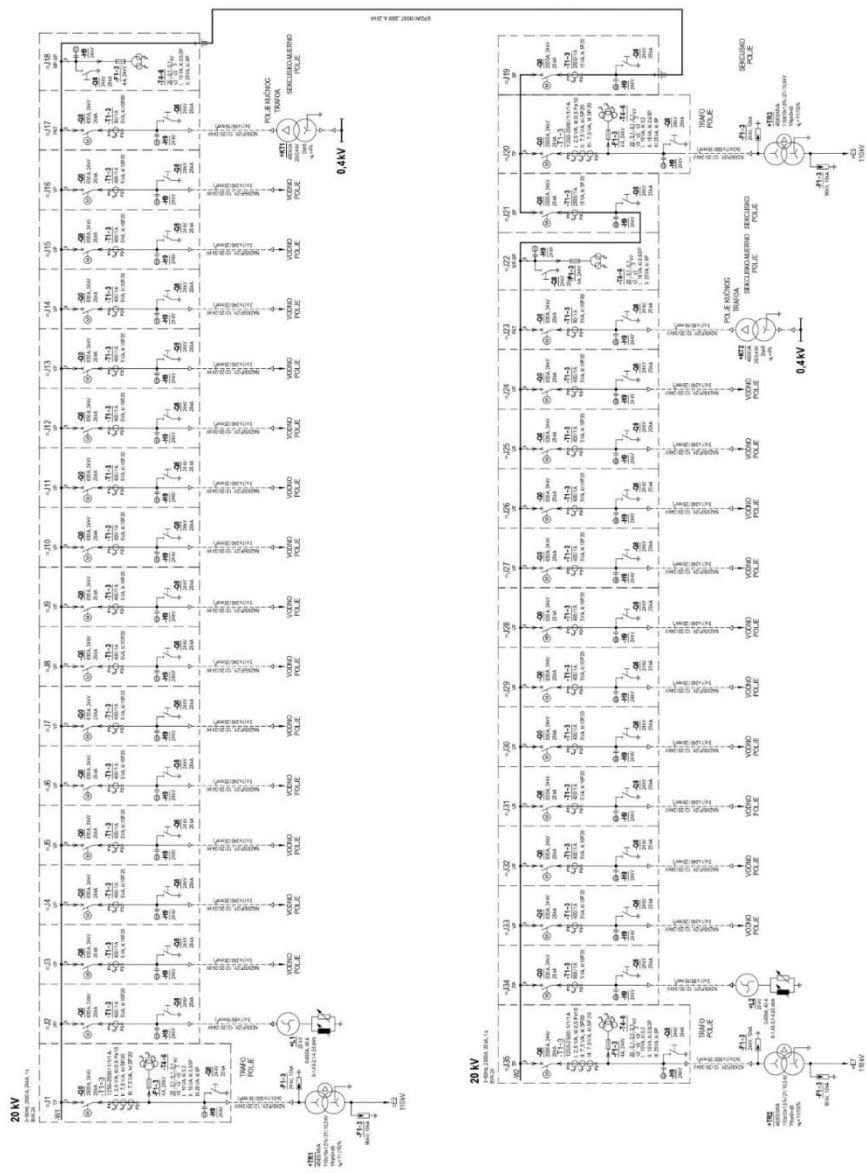
Sklopni blokovi opremljeni su vakuumskim prekidačima tip kao iz serije VKSigma (kompaktna izvedba), “Končar – Električni aparati srednjeg napona d.d.” nazivnih napona 24 kV, čiji su polovi smješteni u izolacijskim cijevima koji služe kao nosači primarnog strujnog kruga. Napravljeni su kao trolejne jedinice što je moguće manjih dimenzija i mase, a namijenjeni su za unutrašnju ugradnju. Pri obustavljanju strujnog protjecanja, gašenje električnog luka se odvija u prekidnoj komori u kojoj vakuum iznosi  $10^{-2}$  do  $10^{-6}$  Pa. Napon luka kao i vrijeme njegovog djelovanja u vakuumu su malog iznosa zbog čega imamo malu energiju luka, pa odabrani uređaj ima veliku električnu trajnost.

U svrhu održavanja navedenog postrojenja u svim vodnim i transformatorskim poljima namijenjeni su trolejni zemljospojnici čiji nazivni napon iznosi 24 kV, kratkotrajno podnosive struje kratkog spoja 25 kA (1s). Zemljospojnici kao dio svoje opreme posjeduju elektromagnetsku blokadu i imaju ručni pogon. Upravljanje zemljospojnicima moguće je i s prednje strane bloka.

Za potrebe mjerenja i zaštite u sklopne blokove ugrađuju se standardni strujni mjerni transformatori i naponski mjerni transformatori. Položaj mjernih transformatora je u kabelskom odjeljku sklopnog bloka, koji je s aparatnim odjeljkom spojen pomoću provodnih izolatora. Niskonaponski i visokonaponski vodiči namota proizvedeni su od elektrolitskog bakra. Priključci su također proizvedeni od bakra i zaštićeni su od korozije galvanskom metodom.

Oklopljeni spojni most za povezivanje dvije sekcije 20 kV postrojenja, nazivni podataka 24 kV, 2500 A, kratkotrajno podnosiva struja 25 kA (1s) i podnosiva udarna struja 62,5 kA će se izvesti iz uobičajenih spojnih, priključnih i montažnih elemenata. Spojni vod izveden je izoliranim plosnatim bakrenim vodičima 2x100x10 mm postavljenim na potporne izolatore. Metalni oklop spojnog mosta izrađuje se od pocinčanog čeličnog lima čija debljina iznosi 1,5–2,0 mm, a površinska zaštita izvršena je plastificiranjem. Na nosivoj konstrukciji metalnog oklopa postavljeni su čelični nosači na koje se montiraju potporni izolatori.



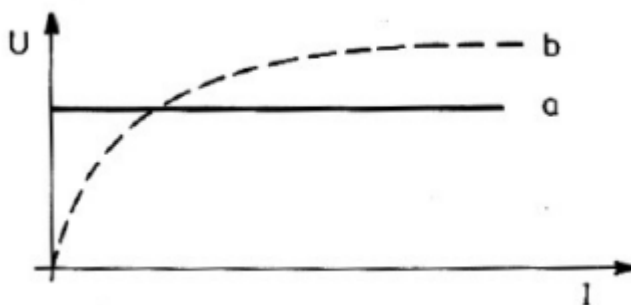


Slika 2.2. Jednopolna shema 20 kV [4]

### 3. ODVODNICI PRENAPONA

#### 3.1. Općenito o odvodnicima prenapona

Odvodnici prenapona imaju veoma nelinearnu karakteristiku čiji se iznos mijenja u ovisnosti od veličine narinutog napona.



Slika 3.1. U-I karakteristika idealnog (a) i realnog (b) odvodnika prenapona [1]

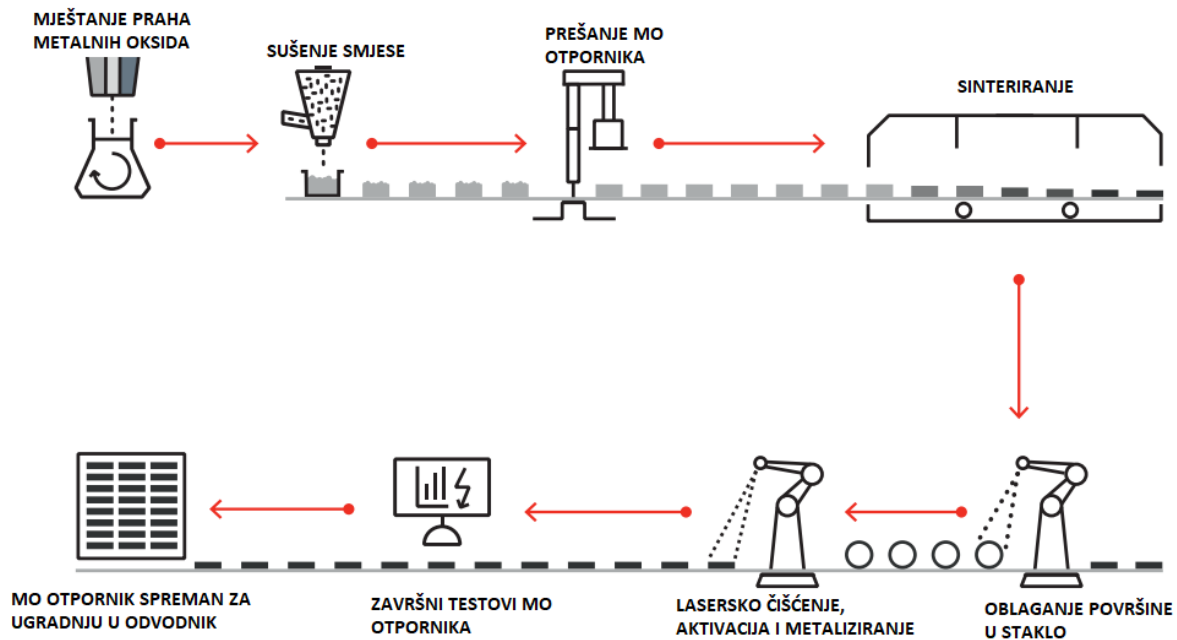
U praksi postoji nekoliko vrsta zaštitnih naprava za ograničavanje prenapona:

- zaštitna iskrišta
- cijevni odvodnici prenapona
- ventilni odvodnici prenapona

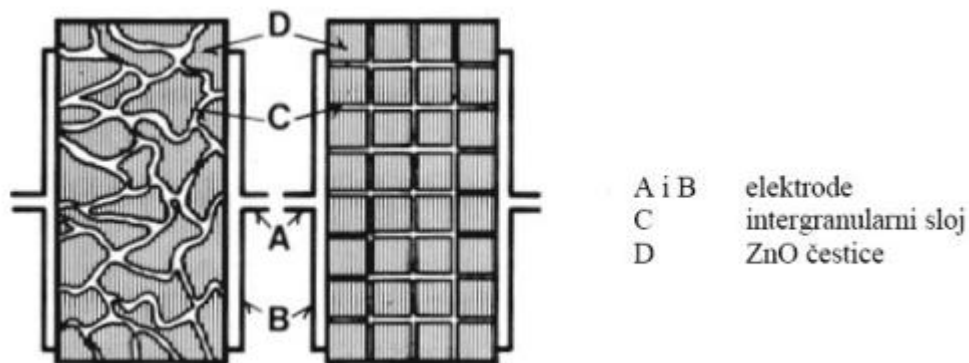
Metal oksidni odvodnici prenapona su odvodnici s nelinearnim otporima od metalnih oksida bez iskrišta. Imaju izrazito pravocrtnu U-I karakteristiku i kučište od kompozitne izolacije. Karakterizira ih visoka kvaliteta, dobre zaštitne karakteristike te relativno niska cijena. Upravo se ovi odvodnici prenapona koriste u zaštiti 110 kV i 20 kV postrojenja.

### 3.2. Metal oksidni odvodnici prenapona

Metal oksidni odvodnici prenapona sastoje se od serijski spojenih otpornika odnosno varistora, bez iskrišta. To su odvodnici koji imaju izrazito pravokutnu naponsko-strujnu karakteristiku. Spomenuti varistori su keramički otpornici napravljeni od zrnaca cink oksida (ZnO) uz dodatak još devet aditiva.



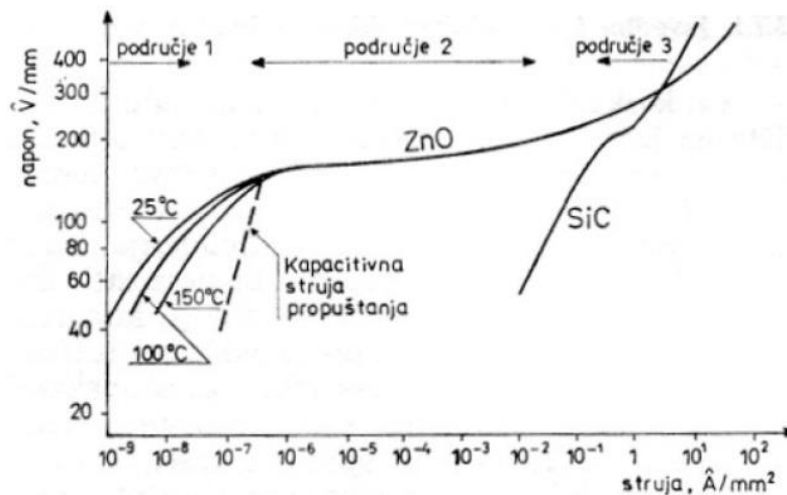
Slika 3.2. Tehnološki proces dobivanja MO otpornika [9]



Slika 3.3. Mikroskopska struktura varistora [1]

Čestice ZnO su vodljive i međusobno serijski i paralelno vezane. Karakteristike navedenih varistora su izrazito nelinearna strujno-naponska karakteristika, visoka sposobnost apsorpcije energije i visoka termička vodljivost.

Aktivni dio metal oksidnih odvodnika izveden je od cilindričnih otpornika koji imaju oblik pločica. Broj pločica ovisi o nazivnom naponu odvodnika, a nalaze se u zatvorenom izolacijskom kućištu koje može biti silikonsko ili porculansko. Prostor između tih pločica i silikonskog kućišta može biti ispunjen plinom ili se porculansko kućište nanosi direktno na pločice. Pri pogonskom naponu pločice imaju kapacitivni karakter što znači da rasipni kapacitet pločica prema uzemljenim dijelovima uzrokuje nelinearnu raspodjelu potencijala duž odvodnika kod pogonskog napona. Nelinearnost raspodjele potencijala duž odvodnika se povećava s duljinom odvodnika te se zato za mreže viših nazivnih napona (iznad 220 kV) ugrađuju prstenovi za izjednačavanje potencijala koji kompenziraju djelovanje rasipnih kapaciteta.



Slika 3.4. Strujno-naponska karakteristika MO odvodnika [1]

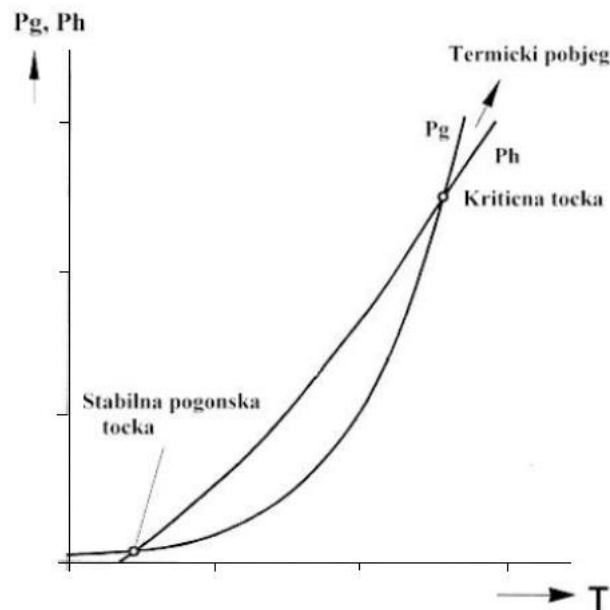
Kako je prikazano na slici, strujno-naponska karakteristika metal oksidnih odvodnika prenapona ima tri područja:

1. područje (područje prije proboja): struja protjecanja je zanemariva, strujno-naponska karakteristika je jako osjetljiva na temperaturu, struja propuštanja je pretežito kapacitivna, pri istosmjernom naponu

koji odgovara trajnom pogonskom naponu protiče radna komponenta struje od oko 0.1 mA, a pripadna kapacitivna komponenta struje pri 50 Hz za ovu vrijednost napona iznosi oko 0.5 mA

2. područje karakterizira nelinearnost, koeficijent nelinearnosti iznosi između 30 i 50. Temperaturna ovisnost u ovom područje je zanemariva. Ovisnost struje o naponu izmjereno je udarnom strujom 8/20  $\mu$ s ( $I > 1$  A).

U području 3. karakteristika više nije toliko nelinearna, a mjerenje karakteristike se izvodi sa udarnom strujom 8/20  $\mu$ s ili 40/10  $\mu$ s.



Slika 3.5. Zagrijavanje i hlađenje MO odvodnika prenapona [1]

Zagrijavanje i hlađenje metal-oksidnih odvodnika pri  $U_c$  (maksimalnoj efektivnoj vrijednosti trajnog pogonskog napona):

- zagrijavanje  $P_g$  se povećava eksponencijalno s porastom temperature
- za temperature  $T > T_{KRITIČNO}$  je  $P_g > P_n$  hlađenje nije dovoljno da disipira zagrijavanje pa se otpornici nastavljaju zagrijavati nakon čega će odvodnik biti uništen uslijed prekomjernog zagrijavanja (termički prebjeg)

- pri dimenzioniranju treba  $T_{KRITIČNO}$  postaviti tako da ne može biti dostignuto niti pri najvećem prenaponu koji se može pojaviti

U ovom radu odabirat će se između ABB-ovih metal-oksidnih odvodnika prenapona tipa PEXLIM. Svi PEXLIM odvodnici koriste silikon za vanjsku izolaciju. Silikonska guma je visoko hidrofobna i otporna na UV zračenje i pokazalo se da je najbolja izolacija (u usporedbi s porculanom i drugim polimerima). ABB koristi posebna punila za poboljšanje svojstava kao i davanje visoke otpornosti na zagađenje. Svi PEXLIM dizajni pokazuju vrlo visoku čvrstoću. Za postrojenje 110 kV odabire se odvodnik PEXLIM-R, a točan model nakon određivanja  $U_c$  i  $U_r$  odabire se iz ABB-ovog kataloga prema sljedećoj tablici (detaljno opisano u sljedećem poglavlju).

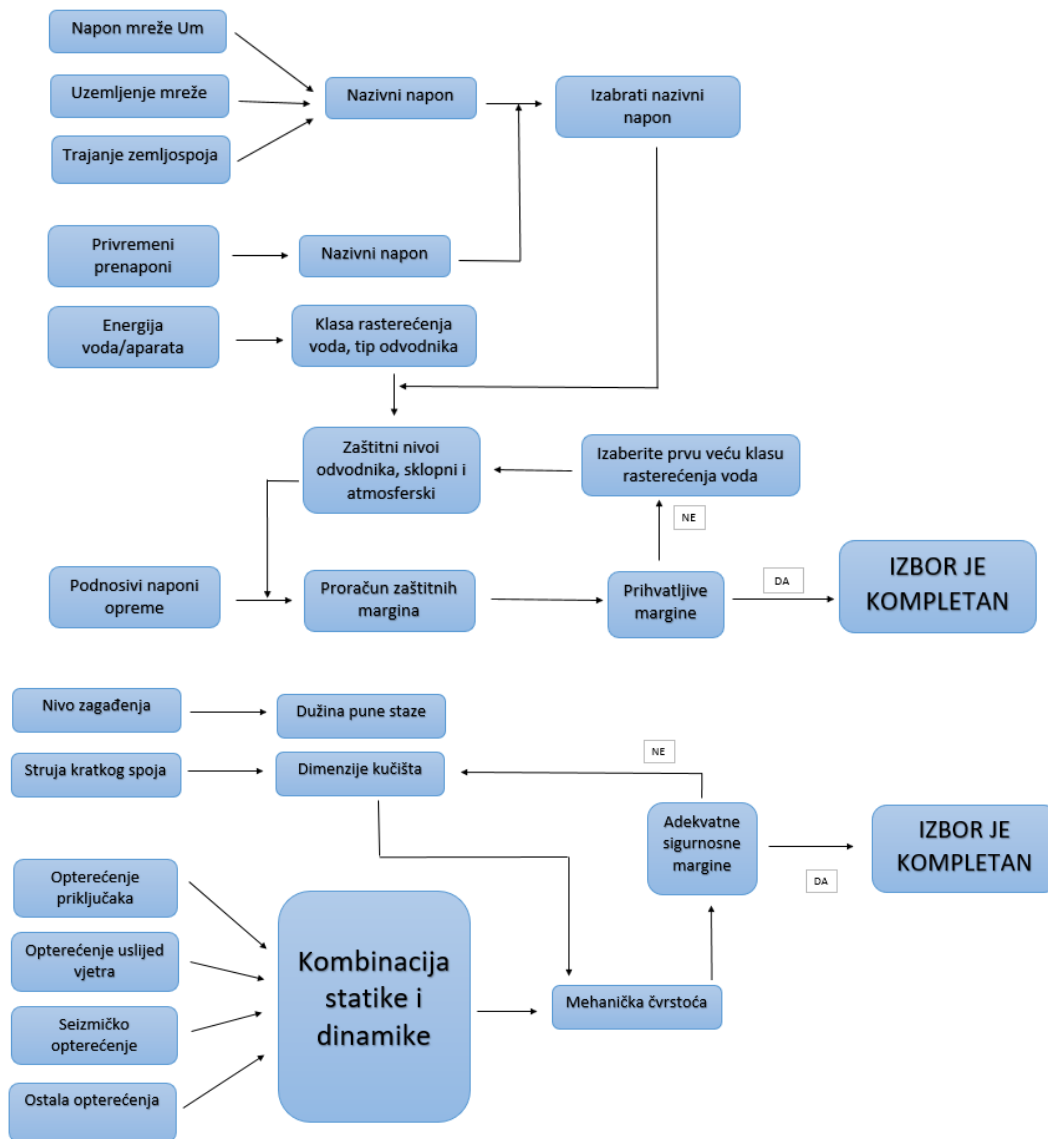
Tablica 3.1. Izbor odvodnika prenapona prema ABB-ovom katalogu [5]

Max. system voltage	Rated voltage	Housing	Cree-page distance	External insulation				Dimensions	
				$U_m$	$U_r$			Mass	Amax
$kV_{rms}$	$kV_{rms}$		mm	$1.2/50 \mu s$ dry	50 Hz wet(60s)	60 Hz wet(10s)	250/2500 $\mu s$ wet	Kg	641
24	18-27	YV024	1863	310	150	150	250	13	641
36	30-48	YV036	1863	310	150	150	250	14	641
52	42-60	YV052	1863	310	150	150	250	14	727
	66	YV052	2270	370	180	180	300	16	641
72	54-60	YH072	1863	310	150	150	250	14	727
	54-72	YV072	2270	370	180	180	300	16	1216
	75-96	YV072	3726	620	300	300	500	24	1216
100	75-96	YV100	3726	620	300	300	500	24	1236
123	90	YH123	3726	620	300	300	500	26	1216
	96-120	YH123	3726	620	300	300	500	25	1322
	90-96	YV123	4133	680	330	330	550	28	1302
	102-132	YV123	4133	680	330	330	550	27	1388
	138-144	YV123	4540	740	360	360	600	29	1236
145	108	YH145	3726	620	300	300	500	27	1216
	120	YH145	3726	620	300	300	500	25	1408
	108	YV145	4540	740	360	360	600	30	1408
	120-144	YV145	4540	740	360	360	600	29	1388
170	132-144	YH170	4540	740	360	360	600	31	1408

Za postrojenje 20 kV prema ABB-ovoj preporuci za niski napon uzet će se odvodnik prenapona MWK tipa te će se u sljedećim poglavljima ispitati zadovoljava li postojeće kriterije.

## 4. ALGORITAM ODABIRA ODVODNIKA PRENAPONA

Dobar odabir metal-oksidnog odvodnika prenapona znači zadovoljenje određenih zahtjeva od kojih se izdvaja što veća otpornost u odnosu na privremene prenapone, što niža zaštitna razina (niži preostali napon), što veća sposobnost apsorpcije energije (veća energetska podnosivost) i što niža cijena. Daljnji postupak odabira odvodnika prenapona temelji se na ABB-ovim tehničkim preporukama.



Slika 4.1. Dijagram toka izbora odvodnika prema tehničkim preporukama ABB-a [5]

Prije svega, potrebno je poznavati parametre elektroenergetske mreže odnosno elektroenergetskog sustava. Jedne od najbitnijih veličina su maksimalni pogonski napon mreže  $U_m$  5-10% viši od nazivnog napona (prikazano u tablici u prvom poglavlju) te visina i trajanje privremenih prenapona (TOV – temporary overvoltages).

Tablica 4.1. Standardni stupnjevi izolacije električne opreme za područja nazivnih napona  $1 \text{ kV} \leq U_{rmax} \leq 245 \text{ kV}$  [1]

Najviši napon opreme – efektivna vrijednost (kV)	Standardni podnosivi kratkotrajni napon pogonske frekvencije 50 Hz – efektivna vrijednost (kV)	Standardni podnosivi atmosferski udarni napon – tjemena vrijednost (kV)
3.6	10	20
		40
7.2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17.5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72.5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050



Sljedeća točka je provjera nenormalnih pogonskih uvjeta odnosno utvrđivanje mogućih nenormalnih pogonskih stanja u elektroenergetskim mrežama koji izazivaju prenaponska naprezanja veća od standardnih.

#### 4.1. Izbor trajnog radnog napona $U_c$ i nazivnog napona odvodnika $U_r$

Trajni radni napon odvodnika  $U_c$  je efektivna vrijednost maksimalnog napona pogonske frekvencije na koji se odvodnik može trajno priključiti (radni napon) dok je  $U_r$  napon koji služi za označavanje odvodnika. Prema ABB-ovoj metodologiji, određuje se trajni radni napon odvodnika  $U_c$  te se pomoću kataloških podataka odabire odgovarajući nazivni napon odvodnika  $U_r$ .

Ukoliko se promatra izolirana ili rezonantno uzemljena mreža ( $U_c \geq U_m$ ), za odvodnik u neutralnoj točki (zvjezdistu) vrijedi:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

Ako se promatra mreža uzemljena preko otpornika velike vrijednosti otpora i automatsko isključenje kvara vrijedi:

$$U_c \geq \frac{U_m}{K_{TOVC}} \quad (4.2)$$

dok za odvodnik u neutralnoj točki (zvjezdistu) mreže vrijedi:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}K_{TOVC}} \quad (4.3)$$

$K_{TOVC}$  je koeficijent podnošenja privremenih prenapona u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ .

Za efikasno uzemljenu mrežu odnosno izravno uzemljenu mrežu ili mrežu uzemljenu preko otpornika ( $K_z \leq 1.4$ ) vrijedi:

$$U_c \geq \frac{1.4 * U_m}{\sqrt{3}K_{TOVc}} \quad (4.4)$$

dok za odvodnik u neutralnoj točki (zvjezdistu) mreže vrijedi:

$$U_c \geq \frac{0.4 * U_m}{K_{TOVc}} \quad (4.5)$$

Nazivni napon odvodnika prenapona  $U_r$  je veličina kojom se opisuje najveći dopušteni efektivni iznos napona, nazivne frekvencije u trajanju od 10 sekundi, koji može vladati između priključaka odvodnika prenapona nakon što je odvodnik prenapona apsorbirao dozvoljeni (nazivni) iznos energije. Nazivni napon odvodnika prenapona određuje se uzimajući u obzir privremene prenapone za koje postoji šansa da se pojave na poziciji na kojoj se ugrađuje odvodnik. Svi privremeni prenaponi ne djeluju u vremenskim intervalima jednakog iznosa te ih izražavamo ekvivalentnim privremenim prenaponima s amplitudama  $U_{eqi}$  i trajanjem 10 sekundi prema dole navedenom izrazu dobivenom iz EN 60099-5:1996:

$$U_{eqi} = U_{TOVi} * \left( \frac{t_{TOVi}}{10} \right)^m \quad (4.6)$$

gdje je:

$U_{eqi}$  – amplituda i-tog ekvivalentnog privremenog prenapona s trajanjem 10 s

$U_{TOVi}$  – amplituda i-tog privremenog prenapona

$t_{TOVi}$  – vrijeme trajanja i-tog privremenog prenapona

$m$  – eksponent reda veličine od 0,018 do 0,022, najčešće se usvaja vrijednost  $m=0,02$  prema EN 60099-5:1996.

Amplituda (efektivna vrijednost) privremenih prenapona uzrokovana dozemnim kratkim spojevima određuje se izrazom:

$$U_{TOV} = k_z \frac{U_m}{\sqrt{3}} [kV] \quad (4.7)$$

gdje je:

–  $k_z$  koeficijent zemljospoj

Koeficijent zemljospoja određuje se pomoću poznatih, odnosno izračunatih nadomjesnih impedancija mreže direktnog, inverznog i nultog sustava. Pri djelovanju jednopolnog kratkog spoja u određenoj točki mreže, do kojeg dolazi spojem sa zemljom, u drugim dvjema zdravim fazama dolazi do povišenja napona u odnosu na zemlju (javljaju se privremeni prenaponi). Koeficijenti zemljospoja S i T faze iznose:

$$k_{z_s} = \left| a^2 - \frac{a^2 * Z_d + a^2 * Z_i + Z_0}{Z_d + Z_i + Z_0} \right| \quad (4.8)$$

$$k_{z_T} = \left| a - \frac{a * Z_d + a^2 * Z_i + Z_0}{Z_d + Z_i + Z_0} \right| \quad (4.9)$$

pri čemu su:

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$Z_d$  - nadomjesna impedancija direktnog sustava reducirana na mjesto nastupa jednopolnog kratkog spoja [ $\Omega$ ]

$Z_i$  - nadomjesna impedancija inverznog sustava reducirana na mjesto nastupa jednopolnog kratkog spoja [ $\Omega$ ]

$Z_0$  - nadomjesna impedancija nultog sustava reducirana na mjesto nastupa jednopolnog kratkog spoja [ $\Omega$ ]

Spomenute impedancije se računaju prema sljedećim izrazima:

$$Z_d = Z_i = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * I_{k3}''} \quad (4.10)$$

$$Z_0 = \frac{1.1 * \sqrt{3} * U_n}{I_{k1}''} - 2 * Z_d \quad (4.11)$$

pri čemu su:

$U_n$  – nazivni napon mreže [kV]

$I_{k1}''$  – struja jednopolnog kratkog spoja [A]

$I_{k3}''$  – struja trolnog kratkog spoja [A]

Pri pojavi dvopolnog kratkog spoja s istovremenim spojem sa zemljom, u zdravoj fazi se javlja privremeni prenapon čiji koeficijent zemljospoja iznosi:

$$k_{zR} = \left| \frac{3 * Z_i * Z_0}{Z_d * Z_i + Z_i * Z_0 + Z_0 * Z_d} \right| \quad (4.12)$$

Amplituda (efektivna vrijednost) privremenih prenapona nastala ispadom tereta može se odrediti iz sljedećeg izraza:

$$U_{TOvit} = k_{it} \frac{U_m}{\sqrt{3}} [kV] \quad (4.13)$$

gdje je:

$k_{it}$  – koeficijent prenapona pri ispadu tereta koji ovisi o vrijednosti ispalog tereta, konfiguraciji i karakteristikama nastale mreže

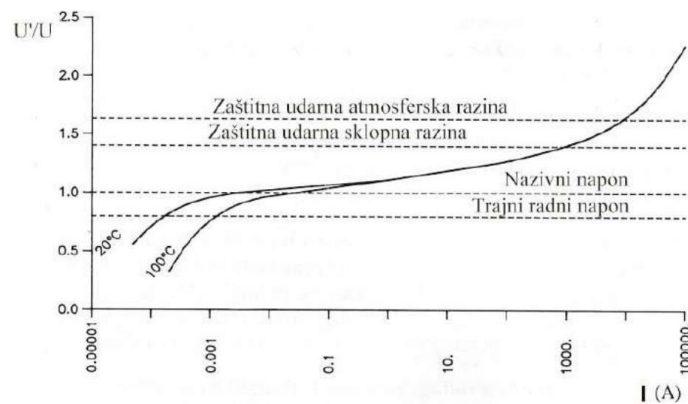
## 4.2. Izbor nazivne odvodne struje odvodnika prenapona $I_n$

Nazivna struja odvođenja odvodnika  $I_n(A)$  je tjemena vrijednost udarne struje valnog oblika 8/20  $\mu s$  koja služi za razvrstavanje odvodnika. Određivanje ove struje sastoji se od procjene amplitude očekivane struje odvođenja kroz odvodnik.

Tablica 4.2. Odabir odvodne struje odvodnika prenapona [1]

Klasa odvodnika $I_n(A)$	Nazivni napon $U_r(kV)$
2500 A	$U_r(kV) \leq 36$
5000 A	$U_r(kV) \leq 132$
10000 A	$3 \leq U_r(kV) \leq 360$
20000 A	$360 \leq U_r(kV) \leq 756$

## 4.3. Provjera zaštitnih razina odvodnika prenapona



Slika 4.2. Zaštite razine odvodnika prenapona [1]

Nazivni napon metal oksidnog odvodnika definira karakteristike odvodnika. Zaštitna razina odvodnika je najviši preostali napon na stezaljkama odvodnika kod proticanja nazivne odvodne struje oblika vala 8/20  $\mu s$ . Taj podatak je naveden u katalogu proizvođača odvodnika prenapona.

#### 4.4. Određivanje klase rasterećenja voda i određivanje energetske podesivosti voda

Klasa rasterećenja voda je posredni način označavanja sposobnosti apsorpcije energije odvodnika. Za energetske naprežanje odvodnika mjerodavni su sklopni prenaponi. Klasa rasterećenja voda predstavlja pretpostavku da na dugom vodu nastaje sklopni prenapon koji se kao putni val energetski rasterećuje kroz priključeni odvodnik prenapona. Postoji pet klasa rasterećenja voda kako je prikazano u sljedećoj tablici.

Tablica 4.3. Određivanje klase rasterećenja voda [1]

Klasa rasterećenja voda	Karakteristična impedancija voda $Z(\Omega)$	Konvencionalno trajanje maksimuma vala $T(\mu s)$	Napon sklopnog prenapona $U_z(kV)$
1	$4.9*U_r$	2000	$3.2*U_r$
2	$2.4*U_r$	2000	$3.2*U_r$
3	$1.3*U_r$	2400	$2.8*U_r$
4	$0.8*U_r$	2800	$2.6*U_r$
5	$0.5*U_r$	3200	$2.4*U_r$

Određivanje energetske podnosivosti odvodnika prenapona provodi se pomoću specifične energije  $\frac{W}{U_r} \left( \frac{kJ}{kV} \right)$ .

$$\left( \frac{W}{U_r} \right) > W' \quad (4.14)$$

Specifična generirana energija pri jednom impulsu rasterećenja voda  $\left( \frac{kJ}{kV} \right)$  u odnosu na nazivni napon odvodnika  $U_r (kV)$  iznosi:

$$W' = \frac{(U_L - U_{REZ}) U_{REZ}}{Z} \frac{1}{U_r} T \left( \frac{kJ}{kV} \right) \quad (4.15)$$

gdje je:

$U_L$  – napon sklopnog prenapona (kV)

$U_{REZ}$  – preostali napon na odvodniku prilikom odvođenja sklopnog strujnog impulsa vala (30/60 $\mu$ s) najmanje amplitude iz kataloga

Z – karakteristična impedancija voda

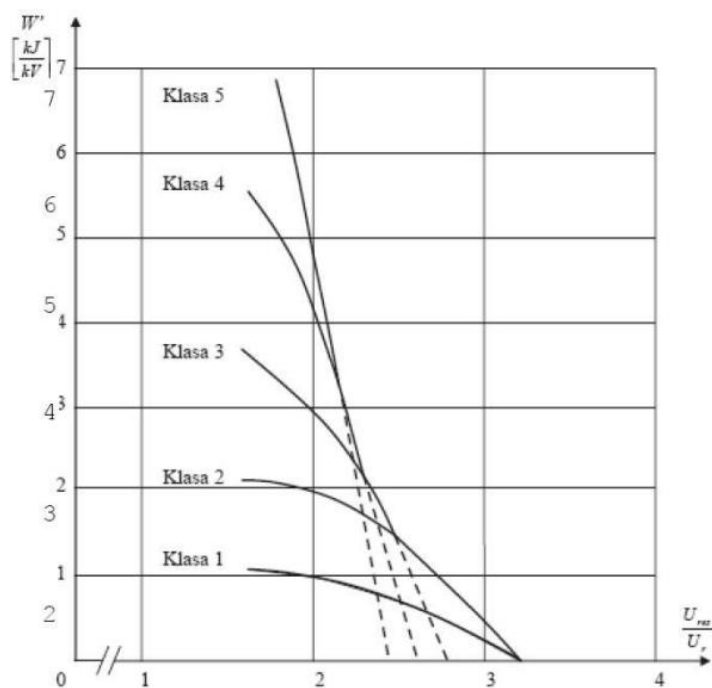
T – konvencionalno trajanje maksimuma vala

Preporuke za izbor klase rasterećenja voda odvodnika za standardne uvjete pogona u mreži glase:

- klasa 2,3 za nazivni napon mreže 110 kV
- klasa 3,4 za nazivni napon mreže 220 kV, 400 kV
- klasa 2,1 za nazivni napon mreže 35 kV, 20 kV, 10 kV

Također postoji i grafički postupak.

$$W' = f\left(\frac{U_{psmin}}{U_r}\right) \quad (4.15)$$



Slika 4.3. Ovisnost specifične generirane energije o odnosu preostalog i nazivnog napona [1]

#### 4.5. Izbor kućišta odvodnika prenapona

Dužina kućišta odvodnika je dužina aktivnog dijela, a određuje se ispitivanjem podnosivim naponom kako je prikazano u sljedećoj tablici.

Tablica 4.4. Izračun dužine kućišta odvodnika [1]

	$I_n = 10 \text{ kA i } 20 \text{ kA}$		$I_n \leq 5 \text{ kA}$
	$U_r \geq 200 \text{ kV}$	$U_r < 200 \text{ kV}$	
Ispitivanje atmosferskim udarnim naponom	1.3 * atmosferska zaštitna razina		
Ispitivanje sklopnim udarnim naponom	1.25*sklopna zaštitna razina	/	/
Ispitivanje naponom pogonske frekvencije (1 min)	/	1.06*sklopna zaštitna razina	0.88 * atmosferska zaštitna razina



Specifična dužina klizne staze (mm/kV) u odnosu na maksimalni pogonski napon ovisi o razini zagađenja kako je prikazano u sljedećoj tablici.

Tablica 4.5. Specifična dužina klizne staze u odnosu na razinu zagađenja [1]

Razina zagađenja	Specifična dužina klizne staze (mm/kV)
I (lako zagađenje)	16
II (srednje zagađenje)	20
III (teško zagađenje)	25
IV (vrlo teško zagađenje)	31

Definira se još i klasa zaštite od nadtlaka jer je u pogonu odvodnika moguće preopterećenje i unutarnji kvar odvodnika.

Dopušteno mehaničko opterećenje definira vrijednosti dopuštenog statičkog i dinamičkog momenta. Utjecaj jakog vjetra na području gdje se nalazi odvodnik može uzrokovati porast mehaničkog opterećenja u horizontalnom smjeru, a na površini odvodnika prenapona javlja se sila  $F$  koja se izračunava pomoću sljedećeg izraza:

$$F = p * l_0 * D * k_w \quad (4.16)$$

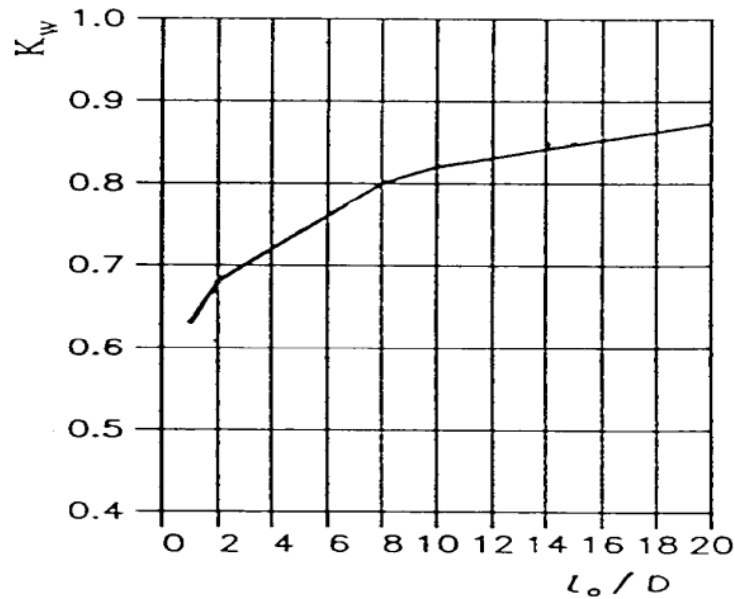
gdje je:

$p$  - tlak vjetra na površinu odvodnika prenapona [ $N/m^2$  ]

$l_0$  - dužina/visina odvodnika prenapona [m]

$D$  - srednji promjer odvodnika prenapona [m]

$k_w$  - koeficijent korekcije tlaka za objekte cilindričnog oblika



Slika 4.4. Ovisnost koeficijenta korekcije o pritisku vjetra [2]

Moment savijanja s obzirom na bazu odvodnika prenapona se računa iz sljedećeg izraza:

$$M = 0.5 * F * l_0 \quad (4.17)$$

#### 4.6. Provjera zone štíćenja odvodnika prenapona

Zaštitna zona odvodnika prenapona određuje se prema sljedećoj formuli:

$$L_{zz} = \frac{(k_M * U_{BIL} - U_{RE}) * v}{2S} \quad (4.18)$$

gdje je:

$k_M$  – faktor sigurnosti u odnosu na podnosivi ispitni napon opreme (0.8)

$U_{BIL}$  – nivo izolacije opreme: za  $U_m = 123 \text{ kV}$  iznosi 550 kV, za  $U_m = 24 \text{ kV}$  iznosi 125 kV

$U_{RE}$  – preostali napon odvodnika kod 10 kA ( $U_m = 123$  kV iznosi 249 kV, za  $U_m = 24$  kV iznosi 73.7 kV)

$v$  – brzina prenaponskog vala (zračni vod, 300 m/s)

$S$  – strmina prenaponskog vala (1200 kV/ $\mu$ s)

## 5. ODABIR ODVODNIKA PRENAPONA ZA ZAŠTITU POSTROJENJA 110 kV

### 5.1. Izbor trajnog radnog napona $U_c$ i nazivnog napona odvodnika $U_r$

Najviši napon mreže  $U_m$  ovisi o nazivnom naponu mreže, a za mrežu 110 kV iznosi 123 kV.

Pri izračunu trajnog radnog napona odvodnika prenapona ukoliko je nepoznata najviša odnosno tjemena vrijednost faznog radnog napona, može se usvojiti vrijednost najvišeg napona mreže ( $U_m$ ) uvećanim za 5% zbog mogućeg sadržaja viših harmonika. Prema tome, slijedi da trajni radni napon odvodnika prenapona mora zadovoljiti sljedeći izraz:

$$U_c \geq 1.05 \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (5.1)$$

te se dobije:

$$U_c \geq 1.05 \frac{123}{\sqrt{3}} = 74.56 \text{ kV} \quad (5.2)$$

Sljedeći korak je određivanje nazivnog napona odvodnika prenapona  $U_r$ .

Kako je objašnjeno u poglavlju prije prvo se određuje amplituda (efektivna vrijednost) privremenih prenapona prouzročenih dozemnim kratkim spojevima i prenapona prouzročenih ispadom tereta. Prije toga, računaju se sve nepoznanice:

$$Z_d = Z_i = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * I_{k3}''} \quad (5.3)$$

$$Z_0 = \frac{1.1 * \sqrt{3} * U_n}{I_{k1}''} - 2 * Z_d \quad (5.4)$$

Prema proračunu kratkog spoja u prijenosnoj mreži Hrvatske, pri potpunom predviđenom uklopnom stanju mreže nazivne godine struje kratkog spoja iznose:

$$I_{k3}'' = 18738 \angle -79,8^\circ \text{ [A]} \quad (5.5)$$

$$I_{k1}'' = 17773 \angle -79,0^\circ \text{ [A]} \quad (5.6)$$

$$Z_d = Z_i = \frac{1.1 * 110}{\sqrt{3} * 18738 \angle -79,8^\circ} = 3,728 \angle 79,8^\circ \Omega \quad (5.7)$$

$$Z_0 = \frac{1.1 * \sqrt{3} * 110}{17773 \angle -79,0^\circ} - 2 * 3,728 \angle 79,8^\circ = 4,338 \angle 77,6^\circ \Omega \quad (5.8)$$

Koeficijenti zemljospoja pri potpunom uklopnom stanju mreže:

$$k_{z_s} = \left| \frac{(1 \angle 120^\circ)^2 - \frac{(1 \angle 120^\circ)^2 * 3,728 \angle 79,8^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 * 3,728 \angle 79,8^\circ + 4,338 \angle 77,6^\circ}{3,728 \angle 79,8^\circ + 3,728 \angle 79,8^\circ + 4,338 \angle 77,6^\circ}}{(1 \angle 120^\circ)^2} \right| \quad (5.9)$$

$$k_{z_s} = 1.02 \quad (5.10)$$

$$k_{z_T} = \left| \frac{(1 \angle 120^\circ) - \frac{(1 \angle 120^\circ) * 3,728 \angle 79,8^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 * 3,728 \angle 79,8^\circ + 4,338 \angle 77,6^\circ}{3,728 \angle 79,8^\circ + 3,728 \angle 79,8^\circ + 4,338 \angle 77,6^\circ}}{(1 \angle 120^\circ)} \right| \quad (5.11)$$

$$k_{z_T} = 1.04 \quad (5.12)$$

$$k_{z_R} = \left| \frac{3 * 3,728 \angle 79,8^\circ * 4,338 \angle 77,6^\circ}{3,728 \angle 79,8^\circ * 3,728 \angle 79,8^\circ + 3,728 \angle 79,8^\circ * 4,338 \angle 77,6^\circ + 4,338 \angle 77,6^\circ * 3,728 \angle 79,8^\circ} \right| \quad (5.13)$$

$$k_{z_R} = 1.05 \quad (5.14)$$

Pri izračunu amplitude privremenih prenapona prouzročених jednopolnim dozemnim kratkim spojevima koristimo maksimalni koeficijent zemljospoja te se dobije:

$$U_{TOV1} = 1.04 \frac{123}{\sqrt{3}} = 73.64 [kV] \quad (5.15)$$

dok se za amplitude privremenih prenapona prouzročenih trolnim dozemnim kratkim spojevima dobije:

$$U_{TOV2} = 1.05 \frac{123}{\sqrt{3}} = 74.56 [kV] \quad (5.16)$$

Vrijeme potrebno da se kvar ukloni u mrežama s učinkovito uzemljenim zvjezdastima je sigurno kraća od 1 sekunde te se usvaja:

$$t_{TOV1} = t_{TOV2} = 1 s \quad (5.17)$$

Pri izračunu amplitude privremenih prenapona prouzročenih ispadom tereta prvo se utvrđuje vrijednost koeficijenta prenapona pri ispadu tereta. Za postrojenja smještena podalje od elektrane, ukoliko dođe do ispada punog tereta nije moguć nastanak značajnijih privremenih prenapona pa koeficijent prenapona pri ispadu tereta mogu imati vrijednost do 1,2, te se usvaja:

$$k_{it} = 1.2 \quad (5.18)$$

te se dobije:

$$U_{TOVit} = 1.2 \frac{123}{\sqrt{3}} = 85.22 [kV] \quad (5.19)$$

Vrijeme djelovanja privremenih prenapona uzrokovanih ispadom tereta ovisi o regulaciji napona posredstvom regulacijskih sklopki energetskih transformatora i kreće se u području  $10 s \leq t_{TOV} \leq 100 s$  te se usvaja za pogon najnepovoljnija varijanta.

$$t_{TOVit} = 100 \text{ s} \quad (5.20)$$

Sada se može odrediti amplituda ekvivalentnih privremenih prenapona pomoću sljedećih relacija:

$$U_{eqi1} = 73.64 * \left(\frac{1}{10}\right)^{0.02} = 70.36 \text{ kV} \quad (5.21)$$

$$U_{eqi2} = 74.56 * \left(\frac{1}{10}\right)^{0.02} = 71.20 \text{ kV} \quad (5.22)$$

$$U_{eqi3} = 85.22 * \left(\frac{100}{10}\right)^{0.02} = 89.23 \text{ kV} \quad (5.23)$$

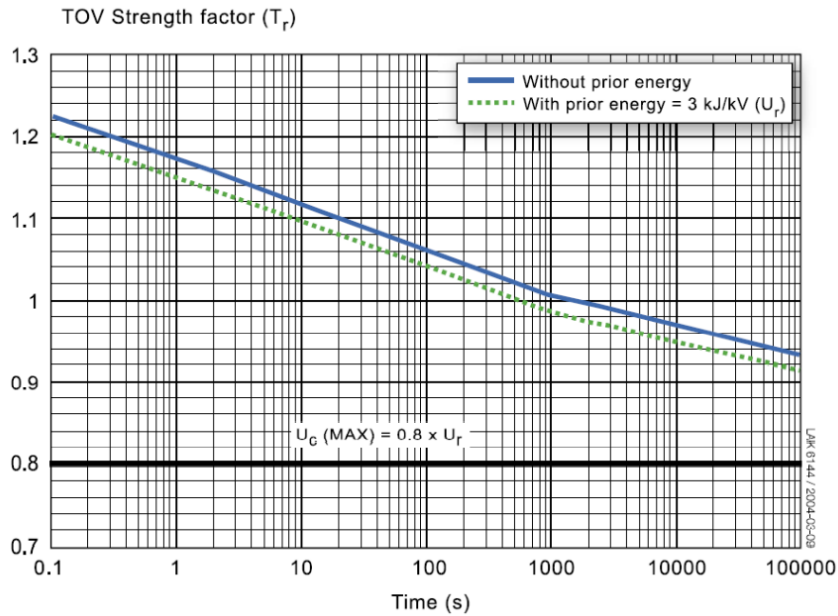
Usvaja se maksimalna vrijednost dobivenih napona te se uzima u obzir sljedeći uvjet:

$$U_r \geq 89.23 \text{ kV} \quad (5.24)$$

U katalogima odvodnika prenapona proizvođači daju vrijednosti, a u tehničkim informacijama daju krivulje koje prikazuju otpornost odvodnika prenapona prema privremenim prenaponima ovisno o njihovom trajanju. Uvodi se nova veličina u proračun  $T_r$ , koeficijent otpornosti odvodnika prenapona koji predstavlja odnos između amplituda privremenih prenapona i nazivnog napona odvodnika prenapona.

$$U_{ri} = \frac{U_{TOVi}}{T_r} \quad (5.25)$$

Za poznata vremena trajanja privremenih napona, iz sljedeće karakteristike očitavamo koeficijent otpornosti odvodnika prenapona.



Slika 5.1. Otpornost odvodnika PEXLIM R na djelovanje privremenih prenapona [2]

Za  $t_{TOV}=1s$  očitava se da je  $T_r = 1.15$ , dok je za  $t_{TOV}=100s$   $T_r = 1.04$ , te se računa:

$$U_{r1} = \frac{73.64}{1.15} = 64.03 \text{ kV} \quad (5.26)$$

$$U_{r2} = \frac{74.56}{1.15} = 64.83 \text{ kV} \quad (5.27)$$

$$U_{r3} = \frac{85.22}{1.04} = 81.94 \quad (5.28)$$

U slučaju da istovremeno nastanu jednopolni kratki spoj te da dođe do ispada tereta pojavljuju se prenaponi veće amplitude. Ovaj slučaj za kruto uzemljene mreže će izazvati najveću amplitudu privremenog prenapona  $1,4 \cdot U_c$  u trajanju od 1 sekunde, odnosno 104,39 kV, te se dobije:

$$U_{r3} = \frac{104.39}{1.15} = 90.77 \text{ kV} \quad (5.29)$$



Prema uputama proizvođača, za nazivni napon odvodnika prenapona odabire se sljedeći veći napon od onog dobivenog u proračunu, dakle prema donjoj tablici, prvi veći napon od 90.77 kV biti će 96 kV.

Tablica 5.1. Električni podaci odvodnika tipa PEXLIM R [5]

Max system voltage $U_s$	Rated voltage $U_r$	Max. Continuous operating voltage		TOV capability		Max. residual voltage with current wave						
		as per IEC $U_c$	as per ANSI/IEEE MCOV $kV_{rms}$	1s $kV_{rms}$	10s $kV_{rms}$	30/60 $\mu$			8/20 $\mu$			
						0.5kA $kV_{peak}$	1kA $kV_{peak}$	2kA $kV_{peak}$	5kA $kV_{peak}$	10kA $kV_{peak}$	20kA $kV_{peak}$	40kA $kV_{peak}$
123	90	72	72	98.9	92.9	186	193	202	220	234	262	299
	96	77	77	105	99.1	198	206	215	235	249	279	319
	102	78	82.6	112	105	210	218	229	250	265	296	339
	108	78	84	118	111	223	231	242	264	280	314	359
	120	78	98	131	123	247	257	269	294	311	349	398
	132	78	106	145	136	272	283	296	323	342	383	438
	138	78	111	151	142	284	295	309	338	358	401	458
	144	78	115	158	148	297	308	323	352	373	418	478
145	108	86	86	118	111	223	231	242	264	280	314	359
	120	92	98	131	123	247	257	269	294	311	349	398
	132	92	106	145	136	272	283	296	323	342	383	438
	138	92	111	151	142	284	295	309	338	358	401	458
	144	92	115	158	148	297	308	323	352	373	418	478
170	132	106	106	145	136	272	283	296	323	342	383	438
	138	108	111	151	142	284	295	309	338	358	401	458
	144	108	115	158	148	297	308	323	352	373	418	478

Na temelju dobivenih podataka iz ABB-ovog kataloga odabire se odgovarajući odvodnik prenapona (tablica 3.1.). Zadovoljavajući odvodnik je PEXLIM R96 – YH123. Na sljedećoj slici prikazan je odvodnik kako je predstavljen u ABB-ovom katalogu.



#### Brief performance data

System voltages ( $U_m$ )	24 - 170 kV
Rated voltages ( $U_r$ )	18 - 144 kV
Nominal discharge current (IEC)	10 kA <sub>peak</sub>
Classifying current (ANSI/IEEE)	10 kA <sub>peak</sub>
<b>Discharge current withstand strength:</b>	
High current 4/10 $\mu$ s	100 kA <sub>peak</sub>
Low current 2 000 $\mu$ s	600 A <sub>peak</sub>
<b>Energy capability:</b>	
Line discharge class (IEC)	Class 2
[2 impulses, (IEC Cl. 8.5.5)]	5.1 kJ/kV ( $U_r$ )
Fulfills/exceeds requirements of ANSI transmission-line discharge test for 170 kV systems.	
<b>Short-circuit / Pressure relief capability</b>	50 kA <sub>sym</sub>
<b>External insulation</b>	Fulfills/exceeds standards
<b>Mechanical strength:</b>	
Specified continuous load (SCL)	1 000 Nm
Specified short-term load (SSL)	1 600 Nm
<b>Service conditions:</b>	
Ambient temperature	-50 °C to +45 °C
Design altitude	max. 1 000 m
Frequency	15 - 62 Hz

Slika 5.2. Prikaz PEXLIM R odvodnika u ABB katalogu [5]

## 5.2. Izbor nazivne odvodne struje odvodnika prenapona $I_n$

Najčešće korišteni odvodnici za zaštitu distribucijskih i prijenosnih mreža su oni klase 10 kA. Ovi otpornici se prema karakteristikama energetske podnosivosti dijele na odvodnike za lake uvjete rada (štite opremu samo od atmosferskih prenapona) i odvodnike za teške uvjete rada (štite opremu atmosferskih i sklopnih prenapona).

## 5.3. Provjera zaštitnih razina odvodnika prenapona

Iz kataloga se iščitava preostali napon odvodnika prenapona za nazivnu struju odvođenja 10 kA, 8/20  $\mu$ s koji u ovom slučaju iznosi 249 kV i standardni podnosivi udarni napon opreme koji u ovom slučaju iznosi 550 kV. Mora biti zadovoljena sljedeća nejednakost:

$$\frac{550}{249} > 1.4 \quad (5.30)$$

$$2.21 > 1.4 \quad (5.31)$$

Dakle odabrani odvodnik prenapona zadovoljava ovaj kriterij.

#### 5.4. Određivanje klase rasterećenja voda i određivanje energetske podesivosti voda

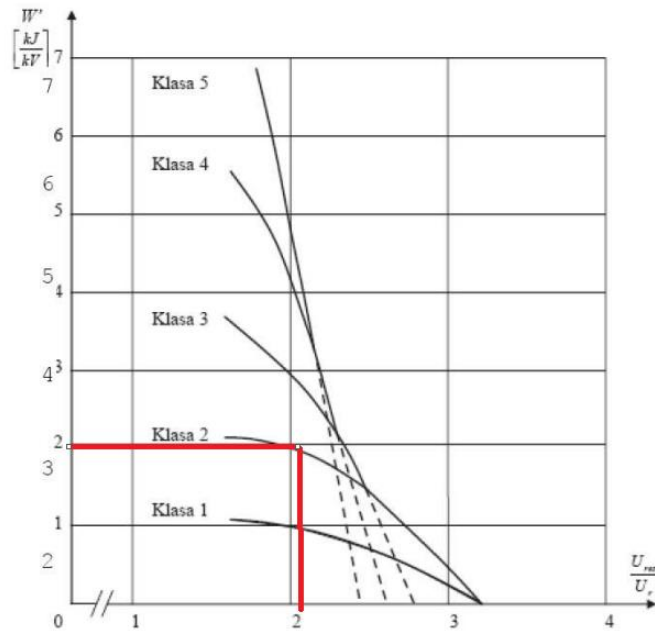
Sada kada je izabran odvodnik, iz kataloga se mogu iščitati ostali podatci. Klasa odvođenja prema IEC je 2, dok nazivna specifična energetska podnosivost  $w_r$  iznosi 5.2 kJ/kV. U istom katalogu nalaze se i potrebne zaštitne karakteristike odvodnika prenapona u odnosu na prenapone atmosferskog i sklopnog podrijetla. Maksimalni preostali naponi u kV pri odvođenju struja oblika 8/20  $\mu$ s iznosi  $U_{pl}=249$ , dok maksimalni preostali napon u kV pri odvođenju struja oblika 30/60  $\mu$ s iznosi  $U_{ps}=198$ .

Nakon određivanja osnovnih parametara kao i zaštitne karakteristike, proučavaju se potencijalna prijelazna stanja čije djelovanje uzrokuje veća energetska naprezanja. Maksimalna energetska naprezanja odvodnika pojavljuju se tokom sklapanja u mreži. Za potrebe proračuna provjere klase odvođenja odvodnika prenapona uvodi se nova varijabla  $U_{ps}$ , preostali napon odvodnika prenapona s obzirom na struju sklapanja. Za ovu varijablu uzima se manja vrijednost od navedenih  $U_{pl}$  i  $U_{ps}$  jer tako se dobije veća vrijednost energije  $W$  koju apsorbira odvodnik prenapona pa tako i veća sigurnost prema potencijalnom energetskom naprezanju.

$$U_{ps} = U_{psmin} = 198 \text{ kV} \quad (5.32)$$

Prema grafu sa slike 5.3. pronalazi se točka sljedećih koordinata

$$\left( \frac{U_{psmin}}{U_r}, w_{max} \right) \quad (5.33)$$



Slika 5.3. Određivanje energetske podnosivosti odvodnika [1]

Apcisa dotične točke tada iznosi:

$$\frac{U_{psmin}}{U_r} = \frac{198}{96} = 2.063 \quad (5.34)$$

Iz dobivenog omjera te poznatih parametara odabranog odvodnika prenapona može se zaključiti da za odvodnik prenapona klase 2, mora biti zadovoljena specifična energetska podnosivost  $w_r \geq 2.063$  kJ/kV. Kako je odabrani odvodnik prenapona specificiran za nazivnu specifičnu energetska podnosivost  $w_r = 5,1$  kJ/kV nazivnog napona, tada se iz ovoga može zaključiti da klasa odvođenja 2 odvodnika prenapona u potpunosti zadovoljava kriterij.

## 5.5 Izbor kućišta odvodnika prenapona

Pri ispitivanju izolacije kućišta odvodnika prenapona najprije se određuju podnosivi naponi kako je prikazano u tablici 4.4. Računa se podnosiva naponska razina u odnosu na atmosferski impuls  $U_{ap}$  te podnosivu naponsku razinu u odnosu na izmjenični napon nazivne frekvencije  $U_{ip}$ .

$$U_{ap} = 1.3 * 249 = 323.7 \text{ kV} \quad (5.35)$$

$$U_{ip} = \frac{1.06}{\sqrt{2}} U_{pl} = \frac{1.06}{\sqrt{2}} 249 = 186.6 \text{ kV} \quad (5.36)$$

gdje je  $U_{pl}$  zaštitna razina odvodnika prenapona u odnosu na atmosferski impuls.

Za odabrani odvodnik prenapona iz kataloga se očitavaju sljedeći podatci:

$$U_{ap} = 553 \text{ kV} > 323.7 \text{ kV} \quad (5.37)$$

$$U_{ip} = 278 \text{ kV} > 186.6 \text{ kV} \quad (5.38)$$

te se može zaključiti da kućište odnosno vanjska izolacija zadovoljava kriterije.

Sljedeći korak je određivanje klizne staze kućišta odvodnika prenapona. Ova analiza ovisi o vanjskim uvjetima u kojima se odvodnik nalaze, odnosno ovisi o razini onečišćenja kako je prikazano u tablici 4.5. Ispravan izbor duljine klizne staze kućišta odvodnika prenapona  $D_{ks}$  mora zadovoljiti sljedeću nejednakost:

$$D_{ks} \geq d_{ksmin} * U_m \quad (5.39)$$

Iz tablice 4.5. se očitava specifična duljina klizne  $d_{ksmin}$  za razinu onečišćenja 3 te se računa:

$$D_{ks} \geq 25 * 123 = 3075 \text{ mm} \quad (5.40)$$

Iz kataloga se očitava  $D_{ksop}$  te se uspoređuje sa dobivenom vrijednosti:

$$D_{ksop} = 3628 \text{ mm} > D_{ks} = 3075 \text{ mm} \quad (5.41)$$

Može se zaključiti da duljina klizne kućišta odabranog odvodnika prenapona zadovoljava kriterij.

U katalogu proizvođača odvodnika prenapona dolazi se do podatka o mogućnosti oslobađanja unutarnjeg tlaka pri kvaru odvodnika prenapona. Sposobnost oslobađanja tlaka odvodnika prenapona za odabrani odvodnik određena je strujom iznosa:  $I_E = 40 \text{ kA}$ . Pravilan izbor odvodnika prenapona s obzirom na mogućnost oslobađanja pritiska mora zadovoljiti sljedeću nejednakost:

$$I_E \geq \max(I_{k3}, I_{k1}) \quad (5.42)$$

Kako je struja  $I_E$  veća i od struje troleznog i jednofaznog kratkog spoja za ovo čvorište, odvodnik prenapona zadovoljava i ovaj kriterij.

Mehaničko opterećenje uslijed vjetra računa se prema izrazu:

$$F = p * l_0 * D * k_w \quad (5.43)$$

Prije toga određuje se vrijednost potrebnih varijabli. Za maksimalnu brzinu vjetra koja se može očekivati uzimamo  $v = 200 \text{ km/h}$ . Ovisnost pritiska vjetra  $p$  na ravnu površinu o brzini vjetra može se iskazati sljedećom relacijom:

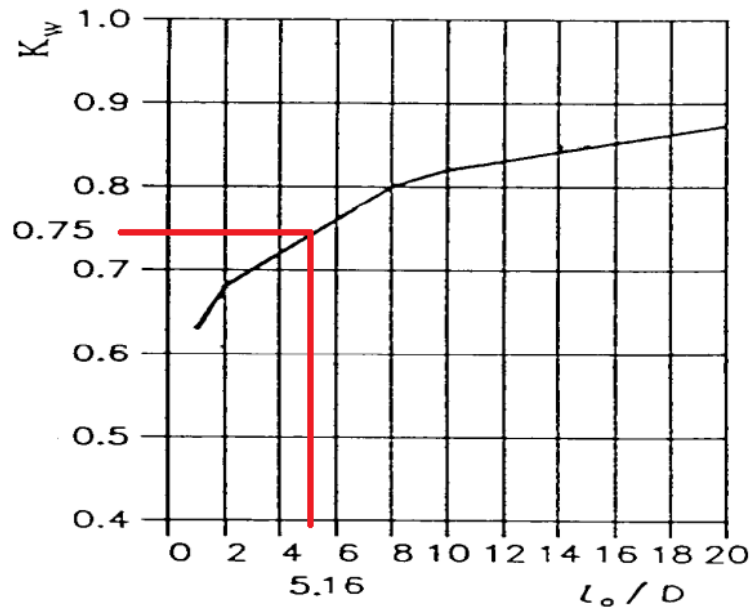
$$p = 0.613 * v^2 = 1892 \text{ N/m}^2 \quad (5.44)$$

Za dobivanje koeficijenta korekcije pritiska za predmete cilindričnog oblika mora se odrediti vrijednost:

$$\frac{l_0}{D} = \frac{995}{193} = 5.16 \quad (5.45)$$

Sa karakteristike koja prikazuje ovisnosti koeficijenta korekcije za određivanje pritiska vjetra na objekte cilindričnog oblika očitava se:

$$k_w = 0.75 \quad (5.46)$$



Slika 5.4. Određivanje koeficijena  $k_w$  [2]

Uvrštavanjem u navedeni izraz, za silu  $F$  dobije se:

$$F = 1892 * 0.995 * 0.193 * 0.75 = 272.5 \text{ N} \quad (5.47)$$

Uvrste li se dobivene vrijednosti u izraz za moment savijanja dobije se:

$$M = \frac{1}{2} * 272.5 * 0.995 = 135.6 \text{ Nm} \quad (5.48)$$

Prema katalogu proizvođača odvodnika prenapona maksimalni dozvoljeni dinamički moment iznosi:

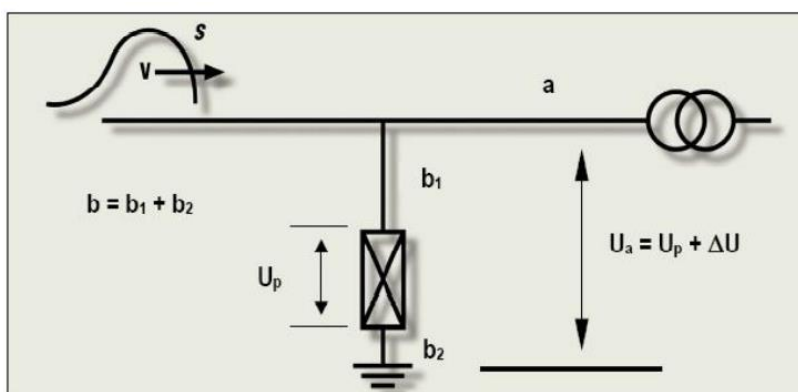
$$M_{op} = 800 \text{ Nm} > M = 135.6 \text{ Nm} \quad (5.49)$$

Uspoređivanjem izračunatog momenta savijanja i dozvoljenog dinamičkog momenta kojeg daje proizvođač može se doći do zaključka da odabrani odvodnik prenapona zadovoljava kriterij.

### 5.6. Izračun zone šticejenja odvodnika prenapona

Prema uputama iz poglavlja 3 računa se zona šticejenja odvodnika prenapona pomoću sljedeće relacije:

$$L_{zz} = \frac{(0.8 * 550 - 249) * 300}{2 * 1200} = 23.9 \text{ m} \quad (5.50)$$



Slika 5.5. Shematski prikaz nailaska putujućeg napona na odvodnik [8]

Da bi zaštita zadovoljila ovaj kriterij, udaljenost šticejenog objekta od odvodnika prenapona ne smije biti veća od zone šticejenja odvodnika prenapona te mora biti zadovoljen sljedeći kriterij:



$$L_{zz} \geq a + b \quad (5.51)$$

gdje su  $a$  i  $b$  upravo te udaljenosti od štíćenog objekta do odvodnika (prema shemi). U ovom slučaju  $a = 3.7$  m i  $b = 3.6$  m. Prema tome:

$$23.9 \text{ m} \geq 7.3 \text{ m} \quad (5.52)$$

Što znači da odabrana zaštita zadovoljava kriterij zone štíćenja.

## 6. ODABIR ODVODNIKA PRENAPONA ZA ZAŠTITU 20 kV POSTROJENJA

### 6.1. Izbor trajnog radnog napona $U_c$ i nazivnog napona odvodnika $U_r$

Kako je rečeno, najviši napon mreže  $U_m$  ovisi o nazivnom naponu mreže, a za mrežu 20 kV iznosi 24 kV.

Kako će prema raspoloživim podacima 20 kV mreža biti uzemljena efikasno preko malog djelatnog otpora i paralelne prigušnice, može se usvojiti da je pogonski napon odvodnika jednak privremenom prenaponu.

$$U_c = U_{TOV} \quad (6.1)$$

Amplituda (efektivna vrijednost) privremenih prenapona izazvanih jednopolnim kratkim spojevima može se odrediti izrazom:

$$U_c = U_{TOV} = k_z \frac{U_m}{\sqrt{3}} \text{ [kV]} \quad (6.2)$$

Koeficijent zemljospoja  $k_z$ , za promatrani sustav, sa neuzemljenim zvjezdištem i kompenzacijom struje zemljospoja iznosi 1.73. Prema tome:

$$U_c = 1.73 \frac{24}{\sqrt{3}} = 24 \text{ kV} \quad (6.3)$$

Primjenom preporuka i kataloga proizvođača ABB odabire se napon  $U_r$ . Prema tablici iz ABB-ovog kataloga nazivni napon odvodnika prenapona  $U_r$  iznosi 30 kV.

Tablica 6.1. Električni podaci MWK odvodnika [6]

Rated voltage	Continuous operating voltage	Residual voltage $U_{res}$ at specified impulse current (Maximum value)									
		Steep current impulse wave 1/... $\mu$ s		Lightning current impulse wave 8/20 $\mu$ s					Switching current impulse wave 30/60 $\mu$ s		
$U_r$	$U_c$	5kA	10kA	1kA	2.5kA	5kA	$I_n = 10kA$	20kA	125A	250A	500A
$kV_{rms}$	$kV_{rms}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$
5	4	12.7	13.5	10.5	11.1	11.7	12.3	14.1	9.2	9.5	9.9
6.3	5	15.9	16.8	13.1	13.9	14.6	15.4	17.6	11.4	11.9	12.4
7.5	6	19.1	20.2	15.8	16.7	17.5	18.5	21.1	13.7	14.3	14.8
8.8	7	22.2	23.5	18.3	19.4	20.3	21.5	24.6	16	16.6	17.2
10	8	25.4	26.9	21	22.2	23.3	24.6	28.1	18.3	19	19.7
11.3	9	28.6	30.2	23.6	25	26.2	27.7	31.6	20.5	21.4	22.2
12.5	10	31.7	33.5	26.1	27.7	29	30.7	35	22.8	23.7	24.6
13.8	11	34.9	36.9	28.8	30.5	32	33.8	38.6	25.1	26.1	27.1
15	12	38.1	40.3	31.4	33.3	34.9	36.9	42.1	27.4	28.5	29.6
16.3	13	41.2	43.6	34	36	37.8	40	45.6	29.6	30.8	32
17.5	14	44.3	46.9	36.6	38.7	40.6	43	49.1	31.9	33.2	34.4
18.8	15	47.5	50.3	39.2	41.5	43.6	46.1	52.6	34.2	35.5	36.9
20	16	50.7	53.7	41.9	44.3	46.5	49.2	56.1	36.5	37.9	39.4
21.3	17	53.8	56.9	44.4	47	49.3	52.2	59.6	38.7	40.2	41.8
22.5	18	57	60.3	47.1	49.8	52.3	55.3	63.1	41	42.6	44.3
23.8	19	60.2	63.7	49.7	52.6	55.2	58.4	66.6	43.3	45	46.8
25	20	63.3	67	52.2	55.3	58	61.4	70	45.5	47.3	49.2
26.3	21	66.5	70.4	54.9	58.1	60.9	64.5	73.6	47.8	49.7	51.6
27.5	22	69.7	73.7	57.5	60.9	63.9	67.6	77.1	50.1	52.1	54.1
28.8	23	72.9	77.1	60.1	63.7	66.8	70.7	80.6	52.4	54.5	56.5
30	24	76	80.4	62.7	66.4	69.6	73.7	84.1	54.6	56.8	59

Na temelju dobivenih podataka iz ABB-ovog kataloga odabire se odgovarajući odvodnik prenapona. Odabire se odvodnik tipa MWK. Na sljedećoj slici prikazan je odvodnik kako je predstavljen u ABB-ovom katalogu.

# MWK



## Technical data

Classification according to IEC 60099-4	
Arrester class	SL, Station Low
Line discharge class (LD)	2
Nominal discharge current $I_n$ (8/20 $\mu$ s)	10 kA <sub>peak</sub>
Repetitive charge transfer rating $Q_{rs}$	1.6 As (C)
Rated thermal energy	
$W_{th}$ at $T_{amb} = 40$ °C	5.0 kJ/kV ( $U_1$ ) = 6.25 kJ/kV ( $U_2$ )
$W_{th}$ at $T_{amb} = 55$ °C	4.5 kJ/kV ( $U_1$ ) = 5.625 kJ/kV ( $U_2$ )
High current impulse $I_{hc}$ (4/10 $\mu$ s)	100 kA <sub>peak</sub>
Long duration current impulse	550 A for 2000 $\mu$ s
Short circuit rating $I_c$	20 kA <sub>rms</sub> for 0.2 s

Slika 6.1. Odvodnik prenapona MWK [6]

## 6.2. Izbor nazivne odvodne struje odvodnika prenapona $I_n$

Kako je rečeno u prošlom poglavlju, najčešće korišteni odvodnici za zaštitu distribucijskih i prijenosnih mreža su oni klase 10 kA te to isto vrijedi i za ovaj konkretni slučaj.

## 6.3. Provjera zaštitnih razina odvodinika prenapona

Iz kataloga se iščitava preostali napon odvodnika prenapona za nazivnu struju odvođenja 10 kA, 8/20  $\mu$ s koji u ovom slučaju iznosi 73.7 kV i standardni podnosivi udarni napon opreme koji u ovom slučaju iznosi 125 kV. Mora biti zadovoljena sljedeća nejednakost:

$$\frac{125}{73.7} > 1.4 \quad (6.4)$$

$$1.70 > 1.4$$

(6.5)

Dakle odabrani odvodnik prenapona zadovoljava ovaj kriterij.

#### 6.4. Određivanje klase rasterećenja voda i određivanje energetske podesivosti voda

Sada kada je odabran odvodnik, iz kataloga se mogu iščitati ostali podatci. Klasa odvođenja prema IEC je 2, dok se za nazivnu specifična energetska podnosivost  $w_r$  usvaja iznos 5.5 kJ/kV. U istom katalogu nalaze se i zaštitna karakteristika odabranog odvodnika prenapona u odnosu na prenapone atmosferskog podrijetla (30/60  $\mu$ s) koji iznosi  $U_{ps}=198$  kV.

$$\frac{U_{psmin}}{U_r} = \frac{73.7}{30} = 2.45 \quad (6.6)$$

Iz dobivenom omjera te poznatih parametara odabranog odvodnika prenapona može se zaključiti da za odvodnik prenapona klase 2, mora biti zadovoljena specifična energetska podnosivost  $w_r \geq 2.45$  kJ/kV. Kako je odabrani odvodnik prenapona specificiran za nazivnu specifičnu energetska podnosivost  $w_r = 5.5$  kJ/kV nazivnog napona, tada se iz ovoga može zaključiti da klasa odvođenja 2 odvodnika prenapona u potpunosti zadovoljava kriterij.

#### 6.5. Izbor kućišta odvodnika prenapona

Određivanje klizne staze kućišta odvodnika prenapona za 20 kV postrojenje je sljedeći korak. Ova analiza ovisi o vanjskim uvjetima u kojima se odvodnik nalaze, odnosno ovisi o razini onečišćenja kako je prikazano u tablici 4.5. Pravilni izbor duljine klizne staze kućišta odvodnika prenapona  $D_{ks}$  mora zadovoljiti sljedeću nejednakost:

$$D_{ks} \geq d_{ksmin} * U_m \quad (6.7)$$

Iz tablice 4.5 se očitava specifična duljina klizne staze  $d_{ksmin}$  za razinu onečišćenja 3 te se dobije:

$$D_{ks} \geq 25 * 24 = 600 \text{ mm} \quad (6.8)$$

Iz kataloga se očitava  $D_{ksop}$  te se uspoređuje sa dobivenom vrijednosti:

$$D_{ksop} = 641 \text{ mm} > D_{ks} = 600 \text{ mm} \quad (6.9)$$

Može se zaključiti da duljina klizne kućišta odabranog odvodnika prenapona zadovoljava kriterij.

Tablica 6.2. Parametri MWK odvodnika iz ABB-ovog kataloga [6]

Continuous operating voltage	Creepage distance	Flashover distance	Recommended clearances		Height H	Weight	Insulation withstand voltage of housing 1.2/50μs 50 Hz, 60s, wet			
			E	F			required values acc. to EN/IEC	guaranteed	required values acc. to EN/IEC	guaranteed
$U_c$ $kV_{rms}$	mm	mm	mm	mm	mm	kg	$kV_{peak}$	$kV_{peak}$	$kV_{rms}$	$kV_{rms}$
4	269	183	60	110	187	1.3	16	96	8	41
5	269	183	60	110	187	1.4	21	96	10	41
6	269	183	70	110	187	1.4	25	96	12	41
7	269	183	80	110	187	1.5	28	96	13	41
8	269	183	90	110	187	1.5	32	96	15	41
9	344	223	100	110	227	1.9	37	116	17	50
10	344	223	110	120	227	1.9	40	116	19	50
11	418	263	120	130	267	2.2	44	137	21	58
12	418	263	130	140	267	2.2	48	137	23	58
13	418	263	140	150	267	2.3	52	137	24	58
14	418	263	150	160	267	2.3	56	137	26	58
15	418	263	160	170	267	2.4	60	137	28	58
16	492	303	170	180	307	2.7	64	158	30	67
17	492	303	180	190	307	2.7	68	158	32	67
18	492	303	190	200	307	2.8	72	158	34	67
19	492	303	200	210	307	2.8	76	158	36	67
20	492	303	209	220	307	2.9	80	158	37	67
21	567	343	220	230	347	3.2	84	179	39	76
22	567	343	229	240	347	3.2	88	179	41	76
23	567	343	239	250	347	3.3	92	179	43	76
24	567	343	249	260	347	3.3	96	179	45	76
25	641	383	259	270	387	3.6	100	200	47	85
26	641	383	269	280	387	3.6	104	200	48	85

27	641	383	279	290	387	3.7	108	200	50	85
28	641	383	289	300	387	3.7	112	200	52	85
29	641	383	299	310	387	3.8	116	200	54	85
30	641	383	309	320	387	3.8	120	200	56	85
31	865	503	319	330	507	4.7	124	262	58	111

Mehaničko opterećenje uslijed vjetra računa se prema izrazu:

$$F = p * l_0 * D * k_w \quad (6.10)$$

Prije toga određuje se vrijednost potrebnih varijabli. Za maksimalnu brzinu vjetra koja se može očekivati uzima se  $v = 200 \text{ km/h}$ . Ovisnost tlaka koji će stvoriti vjetar  $p$  na ravnu površinu o brzini vjetra može se iskazati sljedećom relacijom:

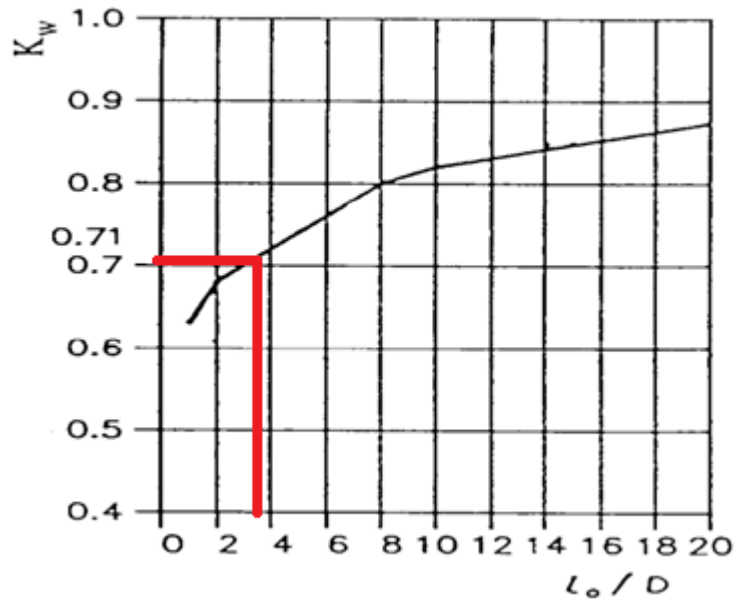
$$p = 0.613 * v^2 = 1892 \text{ N/m}^2 \quad (6.11)$$

Za dobivanje koeficijenta korekcije pritiska za predmete cilindričnog oblika potrebno je odrediti vrijednost:

$$\frac{l_0}{D} = \frac{387}{105} = 3.69 \quad (6.12)$$

Sa karakteristike koja prikazuje ovisnosti koeficijenta korekcije za određivanje pritiska vjetra na objekte cilindričnog oblika može se očitati:

$$k_w = 0.71 \quad (6.13)$$



Slika 6.2. Određivanje koeficijenta  $k_w$  [2]

Uvrštavanjem u navedeni izraz, za silu  $F$  dobije se:

$$F = 1892 * 0.387 * 0.105 * 0.71 = 54.59 \text{ N} \quad (6.14)$$

Uvrste li se dobivene vrijednosti u izraz za moment savijanja dobije se:

$$M = \frac{1}{2} * 54.59 * 0.387 = 10.56 \text{ Nm} \quad (6.15)$$

Prema katalogu proizvođača odvodnika prenapona maksimalni dozvoljeni dinamički moment iznosi:

$$M_{op} = 68 \text{ Nm} > M = 10.56 \text{ Nm} \quad (6.16)$$

Uspoređivanjem izračunatog momenta savijanja i dozvoljenog dinamičkog momenta koji se iščitava iz kataloga može se zaključiti da odabrani odvodnik prenapona zadovoljava kriterij.



## 6.6. Izračun zone štíćenja odvodnika prenapona

Prema formuli iz poglavlja 3.5 i po uzoru na poglavlje 4.5 računa se zona štíćenja odvodnika za postrojenje 20 kV.

$$L_{zz} = \frac{(0.8 * 125 - 73.7) * 300}{2 * 1200} = 3,28 \text{ m} \quad (6.17)$$

Da bi zaštita zadovoljila ovaj kritej, udaljenost štíćenog objekta od odvodnika prenapona ne smije biti veća od zone štíćenja odvodnika prenapona te mora biti zadovoljen sljedeći kriterij:

$$L_{zz} \geq a + b \quad (6.18)$$

gdje su a i b upravo te udaljenosti od štíćenog objekta do odvodnika (prema shemi). U ovom slučaju a = 1.5 m i b = 0.6 m. Prema tome:

$$3.28 \text{ m} \geq 2.1 \text{ m} \quad (6.18)$$

Što znači da odabrana zaštita zadovoljava kriterij zone štíćenja.

## 7. ZAKLJUČAK

Odvodnik prenapona mora biti u stanju izdržati trajni napon električne frekvencije za koji je namijenjen za rad. Također mora isprazniti svu prijelaznu energiju iz sustava u obliku struje, istovremeno sprječavajući da napon preko opreme postane previsok te mora raditi u istom okruženju kao i štićena oprema. Nakon utvrđivanja potrebe za odvodnikom provodi se postupak odabira odvodnika prenapona. Standardni postupak izbora odvodnika prenapona sadrži slijedeće korake; određivanje parametara mreže i očekivanih naponskih napreznja štićene opreme, određivanje tehničkih parametara štićene opreme i okruženja u kojem će odvodnik djelovati, odabir odvodnika na temelju nazivnog napona te prenapona, te provjera kriterija koje odvodnik mora zadovoljavati prema uputama proizvođača. Temeljem ulaznih parametara, trajni radni napon, nazivni napon odvodnika i nazivna struja odvodnika, izvršen je izbor odvodnika prenapona za 110 kV postrojenje. Izabran je odvodnik PEXLIM R96 – YH123 za koji je potvrđena provjera zaštitne razine i zaštitne zone. Na isti način je izvršen postupak odabira odvodnika prenapona za zaštitu 20 kV postrojenja. Izabran je odvodnik MWK za koji je također potvrđena provjera zaštitne razine i zaštitne zone. Proizvođač oba navedena odvodnika je ABB te su se pri provjeri i odabiru odvodnika koristili ABB-ovi katalogi i ABB-ova metodologija. Dokazano je da izabrani odvodnici zadovoljavaju kriterije zaštite.

## LITERATURA

- [1] Predavanja kolegija Tehnika visokog napona, Vitomir Komen, Tehnički fakultet Rijeka
- [2] HEP Elaborat 2 - E3-N15.00.01-E13.0 - Elaborat prenaponske zaštite
- [3] HEP E3-N15.00.01-E02.0 - 110 kV postrojenje
- [4] HEP E3-N15.00.01-E03.0 - 20kV postrojenje
- [5] ABB High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide
- [6] ABB Dana Sheet Surge Arrester MWK
- [7] <https://www.electricalengineering-book.com/pdf/chapter-391027.pdf>
- [8] <http://encron.hr/wp-content/uploads/2016/09/Moderni-odvodnici-prenapona-sredstvo-koordinacije-izolacije-CIGRE-2001.pdf>
- [9] ABB APPLICATION GUIDELINES Overvoltage protection Metal-oxide surge arresters in medium-voltage systems

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Jednopolna shema 110 kV [3] .....	7
Slika 2.2. Jednopolna shema 20 kV [4] .....	10
Slika 3.1. U-I karakteristika idealnog (a) i realnog (b) odvodnika prenapona [1] .....	11
Slika 3.2. Tehnološki proces dobivanja MO otpornika [9] .....	12
Slika 3.3. Mikroskopska struktura varistora [1] .....	12
Slika 3.4. Strujno-naponska karakteristika MO odvodnika [1] .....	13
Slika 3.5. Zagrijavanje i hlađenje MO odvodnika prenapona [1] .....	14
Slika 4.1. Dijagram toka izbora odvodnika prema tehničkim preporukama ABB-a [5] .....	16
Slika 4.2. Zaštite razine odvodnika prenapona [1] .....	22
Slika 4.3. Ovisnost specifične generirane energije o odnosu preostalog i nazivnog napona [1] .....	25
Slika 4.4. Ovisnost koeficijenta korekcije o pritisku vjetra [2] .....	27
Slika 5.1. Otpornost odvodnika PEXLIM R na djelovanje privremenih prenapona [2] .....	33
Slika 5.2. Prikaz PEXLIM R odvodnika u ABB katalogu [5] .....	35
Slika 5.3. Određivanje energetske podnosivosti odvodnika [1] .....	37
Slika 5.4. Određivanje koeficijena kw [2] .....	40
Slika 5.5. Shematski prikaz nailaska putujućeg napona na odvodnik [8] .....	41
Slika 6.1. Odvodnik prenapona MWK [6] .....	45
Slika 6.2. Određivanje koeficijenta kw [2] .....	49

## POPIS TABLICA

Tablica 2.2.1. Nazivni parametri postrojenja 110 kV [3].....	3
Tablica 2.2.2. Nazivni parametri transformatora 40 MVA [3].....	3
Tablica 2.2.3. Nazivni parametri transformatora 63 MVA [3].....	4
Tablica 3.1. Izbor odvodnika prenapona prema ABB-ovom katalogu [5] .....	15
Tablica 4.1. Standardni stupnjevi izolacije električne opreme za područja nazivnih napona $1 \text{ kV} \leq U_{\text{rmax}} \leq 245 \text{ kV}$ [1] .....	17
Tablica 4.2. Odabir odvodne struje odvodnika prenapona [1] .....	22
Tablica 4.3. Određivanje klase rasterećenja voda [1].....	23
Tablica 4.4. Izračun dužine kućišta odvodnika [1].....	25
Tablica 4.5. Specifična dužina klizne staze u odnosu na razinu zagađenja [1] .....	26
Tablica 5.1. Električni podaci odvodnika tipa PEXLIM R [5].....	34
Tablica 6.1. Električni podaci MWK odvodnika [6].....	44
Tablica 6.2. Parametri MWK odvodnika iz ABB-ovog kataloga [6].....	47

## **SAŽETAK**

Prema dobivenom zadatku, u prvom dijelu rada opisana je izvedba, struktura i tehnički parametri 100 kV i 20 kV postrojenja od kojih se sastoji transformatorska stanica te je rečeno nešto općenito o odvodnicima prenapona i zašto ih koristimo. Prateći točke zadane u zadatku, utvrđene su razine naponskim i prenaponskih napreznja što je bio prvi korak ka odabiru ispravnog odvodnika prenapona. Prije nego što je izvršen odabir odvodnika prenapona za navedena postrojenja objašnjen je algoritam odabira na temelju ABB-ove metodologije. U sljedećim poglavljima izvršen je odabir odvodnika za oba postrojenja te provjera kriterija koji odabrani odvodnici moraju zadovoljiti.

Ključne riječi: odvodnik prenapona, prenaponska napreznja, zaštita

## **ABSTRACT**

According to the given task, in the first part of the work, the design, structure and technical parameters of the 100 kV and 20 kV plants that make up the transformer station were described, and something general was said about surge arresters and why we use them. Following the points given in the task, the levels of voltage and overvoltage stresses were determined, which was the first step towards choosing the correct surge arrester. Before the surge arrester was selected for the mentioned plants, the selection algorithm based on ABB's methodology was explained. In the following chapters, the selection of arresters for both plants and the verification of the norms that the selected arresters must meet were made.

Keywords: surge arrester, surge voltages, protection