

## **Niskonapetostne varovalke in odklopniki, primerjava delovanja v pogojih visokih kratkostičnih tokov**

### **Povzetek:**

Prispevek poskuša na enostaven način prikazati fizikalno ozadje delovanja nizkonapetostnih varovalk in odklopnikov v pogojih visokih kratkostičnih tokov. Nadalje poskuša iz posebnosti v delovanju izveleči zaključke, ki pomembno vplivajo na praktično uporabo varovalk in odklopnikov.

### **1. UVOD:**

Pod geslom "Varnost je najvažnejša" so v nadaljevanju predstavljene nizkonapetostne varovalke in odklopniki kot najvažnejši in najpogostejši zaščitni elementi v elektrotehniki oz. v elektroinstalacijah.

Prikazani so osnovni fizikalni in električni procesi v pogojih kratkih stikov. Prispevek poskuša na eni strani prikazati prednosti in slabosti obeh elementov zaščite, na drugi strani pa prikazuje način medsebojnega delovanja s posebnim poudarkom na delovanju v področju visokih kratkostičnih tokov.

Predvsem pa je potrebno pri izbiri zaščitnih elementov upoštevati naslednje kriterije:

- varnost
- zanesljivost
- kakovost
- raznovrstnost
- gospodarnost

Elektroinstalacija mora biti projektirana in izdelana tako, da zaščitna naprava prekine tokokrog le takrat, ko je to res potrebno. Ampak takrat absolutno zanesljivo! Ob pojavu napake mora zaščitna naprava, najsi bo varovalka ali odklopnik, izklopiti tokokrog prej, preden bi lahko prišlo do škode na instalaciji, viru ali potrošniku.

#### **1.1. Prednosti in slabosti talilnih varovalk**

Kot rečeno moramo pri oceni prednosti in slabosti posameznega zaščitnega elementa upoštevati zgoraj navedene kriterije:

- **varnost:**
  - visoka stopnja tokovne omejitve,
  - nizke vrednosti prehodnih integralov
  - ni izhajajočih ionizirajočih plinov,
  - nizke izgubne moči,

- **zanesljivost:**
  - po izklopu se talilni vložek zamenja, nov ima svoje lastnosti v celoti na razpolago,
  - odpornost proti staranju,
  - enostavna uporaba,
- **kakovost:**
  - današnja proizvodnja je visoko avtomatizirana, kar zagotavlja majhna odstopanja v tehničnih lastnostih izdelkov celotne količine iz redne proizvodnje,
- **raznoverstnost;**
  - uporaba v nizko- in visokonapetostnih mrežah,
  - zaščita aparatov in naprav,
  - elektronike,
- **gospodarnost:**
  - v primerjavi s svojimi sposobnostmi in dimenzijami ter ceno, je to najgospodarnejša rešitev.

Slabost talilnih varovalk je predvsem v naslednjih dejstvih:

- da jih je potrebno ob pojavu napake menjati, kar običajno pomeni določen čas brez električne energije,
- težja nastavitve preobremenitvene I-t karakteristike, ki je odvisna od fizikalnih procesov v talilnem elementu,

## 1.2. Prednosti in slabosti odklopnikov :

Primerjava odklopnikov po istih kriterijih:

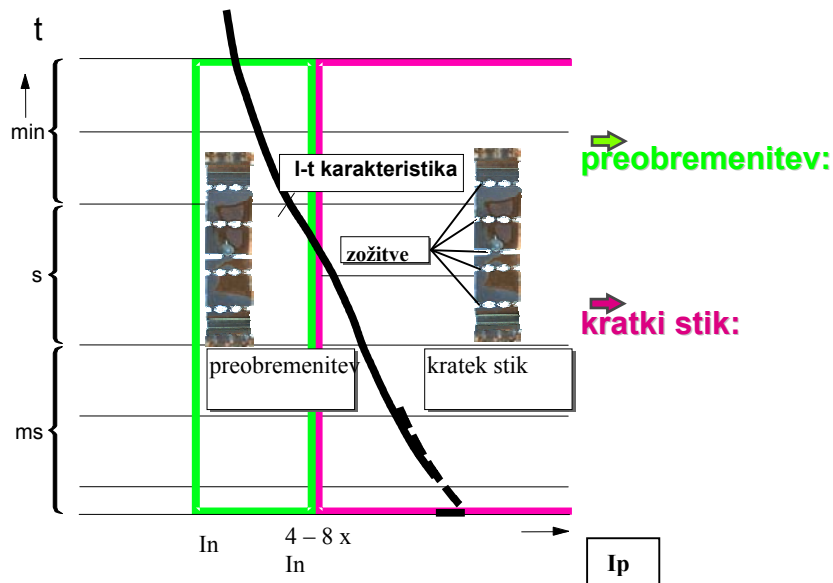
- **Varnost:**
  - Možnost točne nastavitve časovno-tokovne karakteristike,
  - Sicer dovolj velika stopnja tokovne omejitve, vendar na račun gospodarnosti,
- **Zanesljivost:**
  - Moderne konstrukcijske rešitve sicer zagotavljajo visoko stopnjo zanesljivosti, vendar pa vsak odklopnik s časom oz. številom izklopov izgublja na svojih lastnostih,
- **Kakovost:**
  - Podobno velja za kakovost
- **Raznoverstnost:**
  - Zelo široka možnost porabe, na NN , SN in VN nivojih
  - Uporaba elektronike v prožilnih vezjih povečuje uporabnost ,
- **Gospodarnost:**
  - Se kaže predvsem v kratkem času ponovnega vklopa
  - Pri močnostnih odklopnikih gre za veliko razliko v ceni proizvoda.

Slabost odklopnikov se kaže predvsem v naslednjih dejstvih:

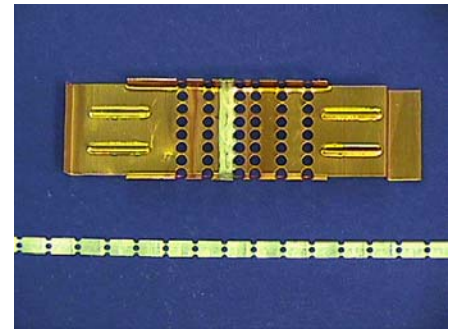
- pri izklopu se pojavi izpuh ionizirajočih plinov, ki lahko v stikalni omari povzročijo različne posledice,
- s številom odklopov kratkih stikov odklopnik izgublja svoje tehnične lastnosti.

## 2. DELOVANJE VAROVALK V KRATKEM STIKU:

Delovanje varovalk v kratkem stiku lahko ponazorimo s časovno-tokovno karakteristiko. V območju od nazivnega toka  $I_n$  do 4-8kratnika nazivnega toka rečemo, da gre za preobremenitev. V območju višjih kratkostičnih tokov pa govorimo o kratkem stiku. (Slika 1)



Slika 1



Slika 2

Za pretalitev oslabeledih mest talilnega elementa (Slika2) je potreben primerno velik tok, ki v času (po karakteristiki) dovede dovolj energije za utekočinjenje in uparitev kovine na oslabeledih mestih.

Oznaka  $I_p$  pomeni pričakovani tok kratkega stika, to je tisti tok, ki bi stekel skozi tokokrog, če bi bila varovalka kratko premoščena. Zelo pomemben podatek za vsako varovalko je izklopna zmogljivost.

Kaj pomeni izraz »izklopna zmogljivost«?:

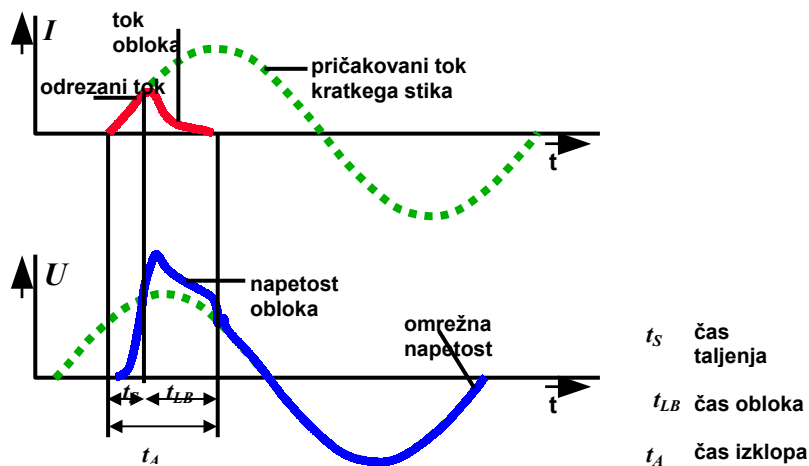
To je lastnost varovalke, da tokokrog, ki ustreza točno določenim pogojem, vedno in pravilno ter brez posledic prekine. Ti točno določeni pogoji so opisani z naslednjimi mejnimi vrednostmi:

- najvišji in najnižji pričakovani tok kratkega stika
- oblika toka in frekvenca
- $\cos\phi$  (za AC), časovna konstanta  $L/R$  (za DC)
- vrednost povratne napetosti

Kaj pomeni izraz »tokovna omejitev«?:

Varovalka izpolnjuje svojo funkcijo tokovne omejitve takrat, ko ob nastanku kratkega stika bistveno omeji dvig toka do maksimalne temenske vrednosti, torej, da prekine tok še preden bi trenutna vrednost toka dosegla maksimalno temensko vrednost.

Grafično je to prikazano na sliki 3. Efekt omejevanja kratkostičnega toka nastopi takrat, ko napetost obloka preseže omrežno napetost pri čemer začne trenutna vrednost toka hitro padati proti ničli. Najvišja trenutna vrednost toka se imenuje odrezani tok (uporablja se tudi izraz : prehodni tok)



Slika 3

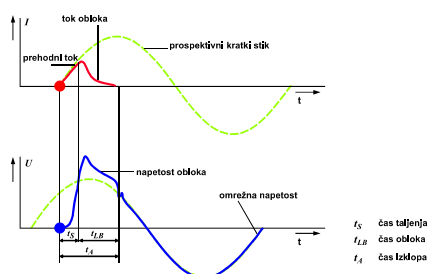
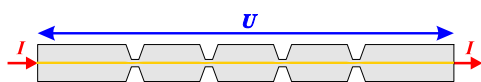
Celotno izklopno fazo delimo v fazo taljenja ali talilno fazo in fazo oblaka ali obločno fazo. Spodnje slike ( od 4 do 8) prikazujejo potek toka in napetosti od začetka nastanka kratkega stika do končne prekinitve toka.

Talilna faza:

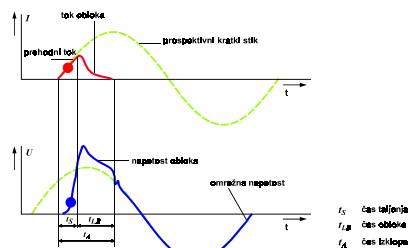
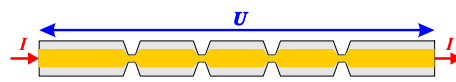
- slika 4: začetek kratkega stika, jakost toka je ponazorjena s širini rumene črte,
- slika 5: trenutna vrednost toka kratkega stika narašča, vendar dovedena energija še ni dovolj velika za pretalitev oslabeledih mest talilnega elementa,
- slika 6: tok doseže vrednost, ko je dovedena energija dovolj velika za pretalitev oslabeledih mest, talilna faza je zaključena, začne se

Obločna faza: značilnost obločne faze je hiter dvig napetosti na talilnem elementu (označeno z modro), ki se ustvari v oblokih na posameznih oslabeledih mestih.

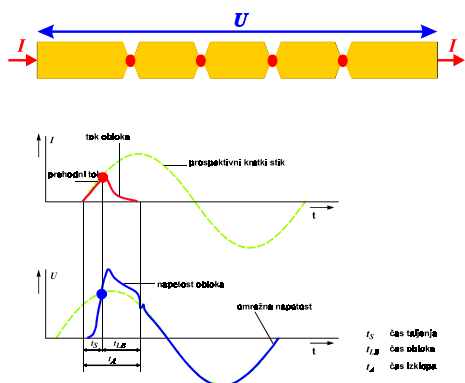
- slika 7: obločna faza je v polnem razmahu, posamezni obloki se ohlajajo v kvarčnem pesku, trenutna vrednost toka pada proti ničli,
- slika 8: tok je prekinjen, obloki ugasnejo, vzpostavi se povratna napetost, ki je enaka omrežni napetosti. Prekinjeni talilni element ima izgled kot je prikazano na slikah 9 in 10.



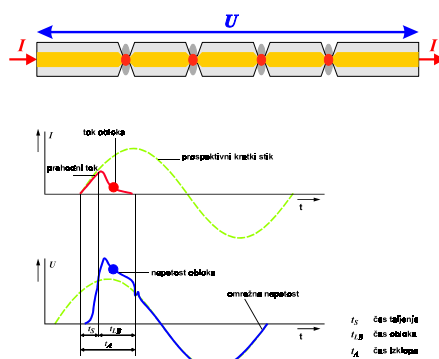
Slika 4



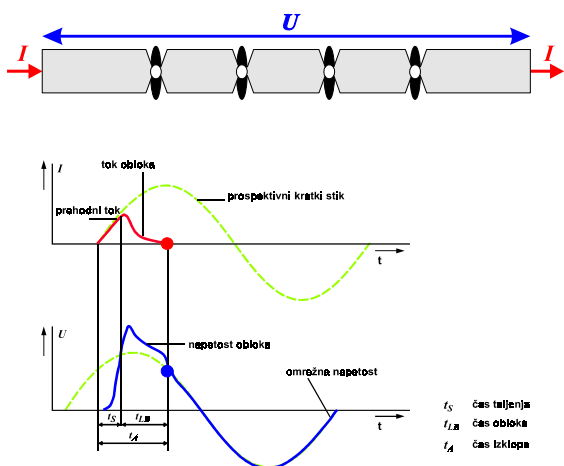
Slika 5



Slika 6



Slika 7



Slika 8



Slika 9



Slika 10

Za dokaj poenostavljeno razumevanja delovanja varovalke v kratkem stiku, je dobro poznati dve vrednosti toka:

I1: maksimalna izklopna zmogljivost (za NV talilne vložke 120kA)

I2: kritični tok (za NV talilne vložke med 1kA do 5kA)

Izklop pri toku I1:

Vsa oslabela mesta se v trenutku prekinejo, ("primarni razpad")

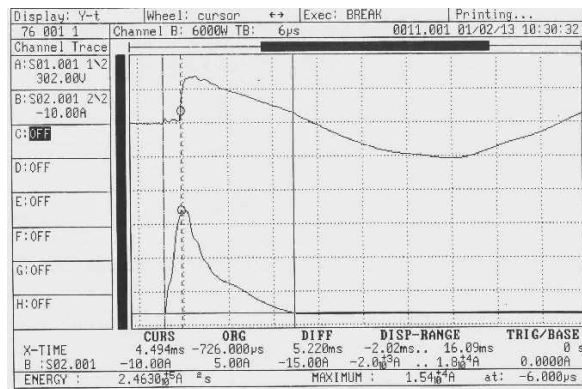
Pojavijo se t.i. delni obloki dolžine celotnega oslabelega mesta,

Na vsakem oslabelem mestu nastane obločna napetost v višini 150-200 V,

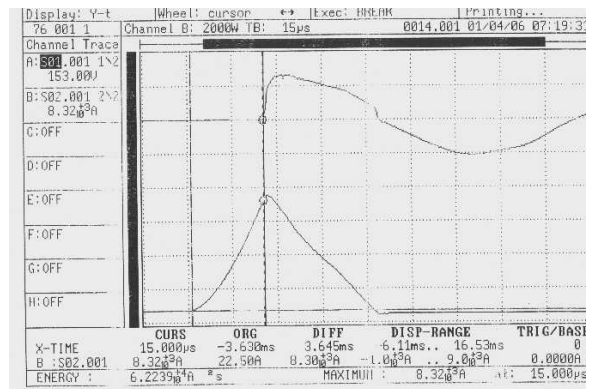
Višina obločne napetosti je odvisna od :

- Pogojev odvajanja toplote na okoliški kvarčni pesek, boljši so pogoji, manjša je temperatura obloka, višja je obločna napetost,
- Velikosti toka, višji je tok ,večja je obločna napetost
- Dolžina obločnega kanala, večja je dolžina, višja je obločna napetost
- Presek obločnega kanala, ožji je kanal, večja je obločna napetost

Oscilogram toka in napetosti pri izklopu pri I1 kaže naslednja slika 11.



Slika 11



Slika 12

Vrednost integrala  $I^2t = 24.630 \text{ A}^2\text{s}$  (celotni integral, toplotni impulz). Značilna je zelo kratka talilna faza, hiter dvig obločne napetosti.

Izklop pri toku I2:

Oslabela mesta se prekinajo posamično in to samo v eni točki, ("razpad zaradi odžiga elektrod")

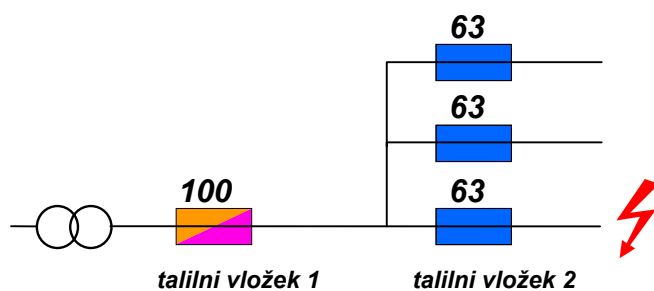
Na vsakem oslabelem mestu nastane najprej zelo kratek delni oblok, ki nato odgoreva na obeh elektrodah, oblok se podaljšuje s konstantno hitrostjo.

Hitrost uparjevanja talilnega elementa je 10X do 1000X manjša kot pri primarnem razpadu

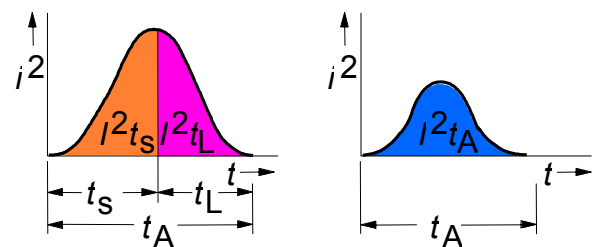
Oscilogram izklopa pri toku I2 kaže slika 12

Max obločna napetost je višja od temenske vrednosti omrežne napetosti, dvig obločne napetosti je bistveno počasnejši, Vrednost integrala  $I^2t = 62.239 \text{ A}^2\text{s}$ , Talilna faza je daljša, obločna faza je daljša.

### 3. SELEKTIVNOST ZAPOREDNO VEZANIH VAROVALK:



Slika13



Slika14

Selektivnost je zagotovljena, kadar je oranžna površina večja od modre. Torej, kadar je talilni integral predhodne varovalke večji od skupnega integrala naknadno vgrajene varovalke.

Dejstvo je, da so varovalke selektivne, če je so nazivni tokovi v razmerju večjem od 1:1.6.

Primer:  $100A$   $63A$

$$I^2 t_s = 7700 A^2 s$$

$$I^2 t_{tb} = 10300 A^2 s$$


---


$$I^2 t_s = 24000 A^2 s > I^2 t_A = 18000 A^2 s$$

### 3.1. Izklopno delo:

Izklopno delo je v tokokrogu nastajajoča električna energija, ki se v obloku spremeni v toplotno energijo (in jo sprejme kvarčni pesek)

$$W_a = \int_{ts}^{ta} u_{LB} i_d dt = W_m + W_c \quad (\text{produkt toka in napetosti v obločni fazi})$$

$$W_m = \frac{1}{2} L_c I_m^2 \quad \text{potencialna elektromagnetna energija v tokokrogu}$$

$I_m =$  vrednost toka v trenutku prekinitve  
 $L_c =$  induktivnost tokokroga

$$W_c = \int_{ts}^{ta} u_c i_d dt \quad \text{energija, ki se iz izvora dovaja v času trajanja obloka}$$

Izklopno delo je enako najmanj potencialni elektromagnetni energiji. Povečuje se z razmerjem : obločni čas:talilni čas

### 3.2. Izklopni impulz, talilni impulz, obločni impulz:

1. **Talilni impulz:** vrednost, ki jo poda proizvajalec in pomeni potrebno energijo za pretalitev oslabeledih mest talilnega elementa

$$\Delta K_m = \int_0^{ts} i dt$$

2. **Obločni impulz:**  $K_a = \int_{ts}^{ta} i^2 dt$

3. **Izklopni impulz:**  $\Delta K_m + K_a = \int_0^{ta} i^2 dt$

Izklopni impulz pomeni celotno toplotno energijo, ki je prepuščena v tokokrog. Obstajajo tudi »udomačeni izrazi«: talilni integral, obločni integral, celotni integral

### 4. DELOVANJE ODKLOPNIKOV V KRATKEM STIKU:

Spodnje slike predstavljajo shematsko prikazan odklopnik in pripadajoč grafični prikaz oscilograma poteka toka in napetosti. Kontaktno obločni sistem je prikazan zgolj shematsko oz. z modelom, ki je po obliki in izvedbi podoben realnim odklopnikom. Prožilni sistem je

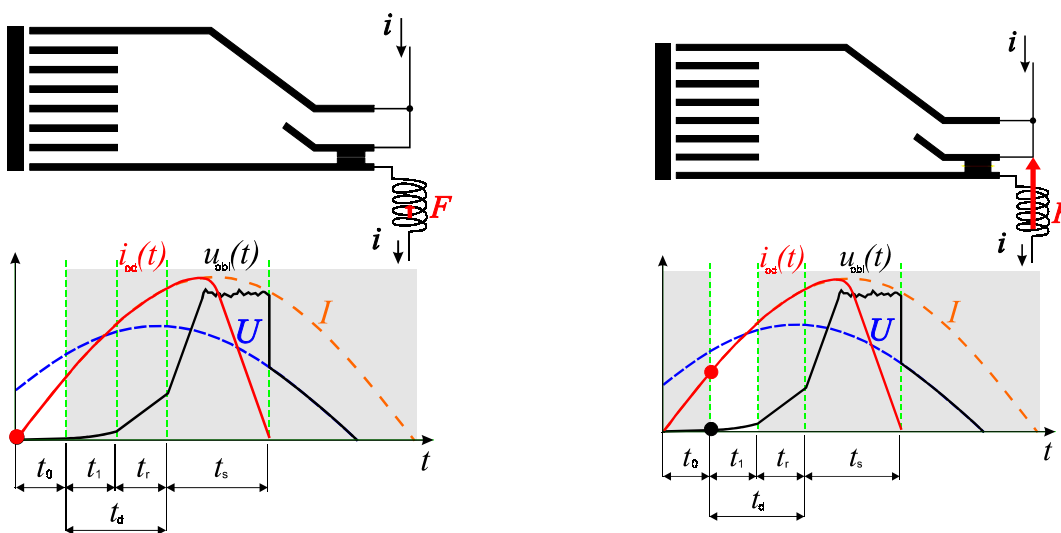
prikazan v obliki tuljave elektromagnetnega sprožnika, ki s silo  $F$  deluje na gibljivi kontakt v smeri odpiranja.

Slika 15: Čas  $t_0$ : čas mehanske zakasnitve: tok kratkega stika začne teči, vendar je sila  $F$  še premajhna, da bi začela proces odpiranja kontaktov, napetost na odklopniku  $U$  je zelo nizka in je enaka padcu napetosti na upornosti med sponkami, zapenjalni sistem je že sproščen, vendar so kontakti zaradi mehanskih zakasnitev še vedno sklenjeni

Slika 16: Čas  $t_1$ : začetek faze obloka med kontaktoma: tok doseže vrednost, ko sila  $F$  že začne odpirati gibljivi kontakt,

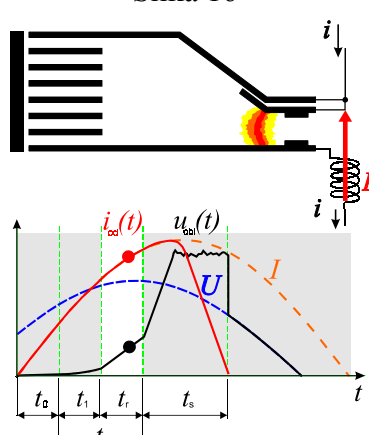
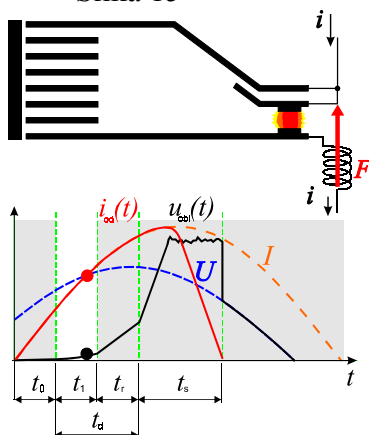
Slika 17: Čas  $t_1$ : konec faze obloka med kontaktoma: kontakti so odprti do te mere, da se pojavi oblok, ki pa gori točno med kontaktnima mestoma, dejanska razdalja med kontaktoma je 1-2mm, napetost na sponkah se poveča za vrednost obločne napetosti, ki pa je še zelo nizka in znaša 10-20V,

Slika 18: Čas  $t_r$ : oblok se pod vplivom Lorenzove sile začne premikati v smeri proti obločni komori, podnožišči obloka se začnejo pomikati tako na gibljivem kontaktu kot tudi na fiksnem kontaktu, ki je podaljšan v obločno letev. Napetost obloka se povečuje.



Slika 15

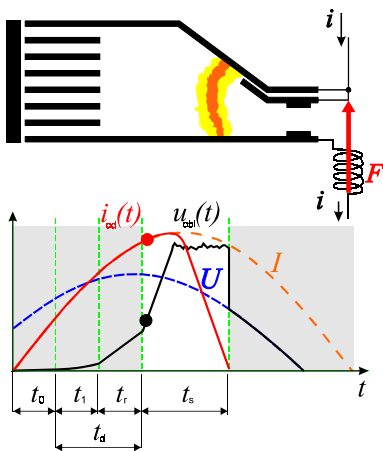
Slika 16



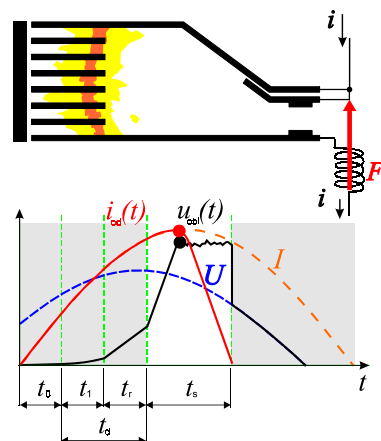
Slika 17

Slika 18





Slika 19



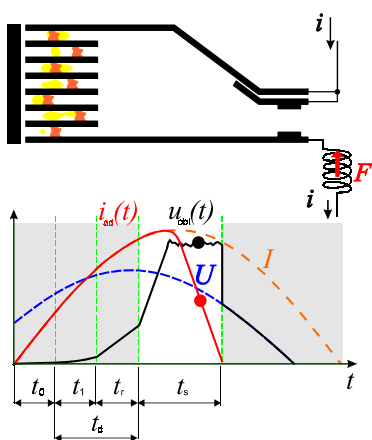
Slika 20

Slika 19: ob zaključku faze  $t_r$  podnožišče obloka preskoči na drugo oblačno letev, začena se faza potovanja do oblačne komore. Oblačna napetost se zelo hitro povečuje.

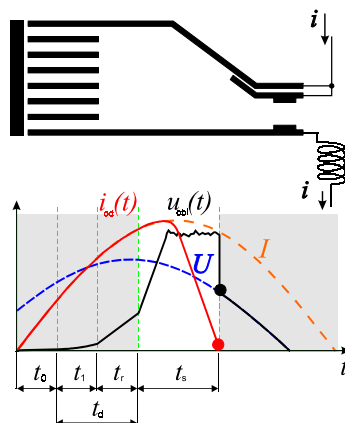
Slika 20: Faza razdelitve obloka med pločvine oblačne komore. Napetost obloka preseže omrežno napetost, nastopi faza omejevanja toka.

Slika 21: Faza vzdrževanja visoke oblačne napetosti in s tem omejevanja toka kratkega stika. Posamezni delni obloki se vzdržujejo med pločvinami oblačne komore. Višina oblačne napetosti je odvisna od števila pločvin v oblačni komori. Mehanizem vzpostavitve oblačne napetosti v paketi pločvin je prikazan v nadaljevanju.

Slika 22: Trenutek ugasnitve obloka in prekinitve toka.



Slika 21

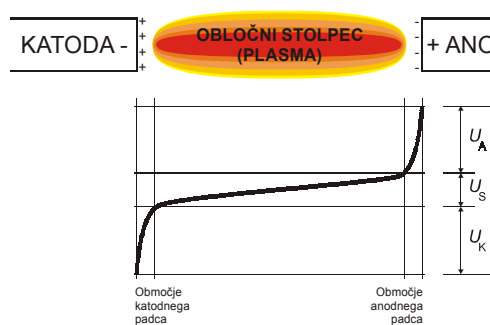


Slika 22

## Mehanizem vzpostavljanja obločne napetosti v odklopnikih:

Oblok je samostojna, termična razelektritev plina, ki nastane pri razklenitvi kontaktov skozi katere teče tok. Sestavljen je iz stolpca plazme in katodnega ter anodnega padca. (Rieder: Plasma und Lichtbogen, 1967) Slika 23 predstavlja zelo idealiziran prikaz obloka.

$U_a$ : anodni padec napetosti  
 $U_k$ : katodni padec napetosti  
 $U_s$ : napetost obločnega stolpca  
 $U_{obl}$  ( $U_{lb}$ )( $U_b$ ): obločna napetost



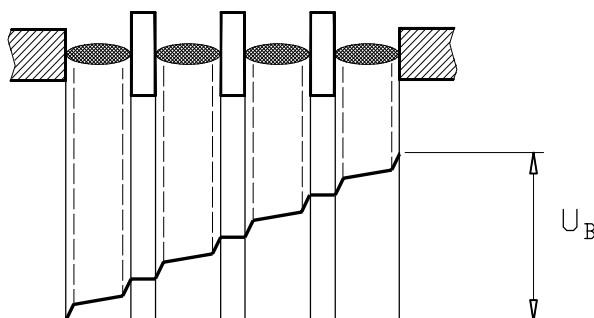
Slika 23

Obločni stolpec, ki gori v stikalih v prostoru, kjer je prisotnih več vrst plinov ali par pod pritiskom, je to praktično plazma v termičnem ravnovesju. To pomeni, da so temperature elektronov, ionov in nevtralnih delcev približno enake. Glavni delež nosilcev toka predstavljajo elektroni, ki so bolj gibljivi od ionov.

Katoda proizvaja elektrone za potrebe toka skozi oblok. V območju anode pa se proizvajajo ioni. Porazdelitev napetosti med obema elektrodama torej ni linearna, ampak se v bližini obeh elektrod pojavita t.i. anodni in katodni padec napetosti. Na sam obločni stolpec odpade manjši del napetosti. Vsota vseh treh vrednosti je obločna napetost, ki znaša okrog 20V.

Dejanska oblika obloka je v precejšnji meri določena s konstrukcijskimi značilnostmi stikalnega aparata in se praviloma zelo razlikuje od opisane idealizirane oblike.

Kako se formira visoka obločna napetost?



Slika 24

Z razdelitvijo obloka v t.i. »delne« obloke prihaja do seštevanja posameznih obločnih napetosti in do potrebne višine obločne napetosti, ki skupaj s padcem napetosti na odklopniku predstavlja dovolj visoko vrednost napetosti na sponkah odklopnika, da zagotavlja funkcijo omejevanja toka kratkega stika.

V praksi se uporabljajo obločne komore z 12-13 pločevinami, kar pomeni da se v njej ustvari 13-14 delnih oblokov. Obločna napetost v komori daje torej odločilen prispevek k omejevanju toka kratkega stika.

Če se sedaj vrnemo na oscilogram toka in napetosti, vidimo, da je višina obločne napetosti v glavnem neodvisna od višine pričakovanega toka kratkega stika, kar pomeni, da se s povečevanjem kratkostičnega toka povečuje tudi celotni integral.

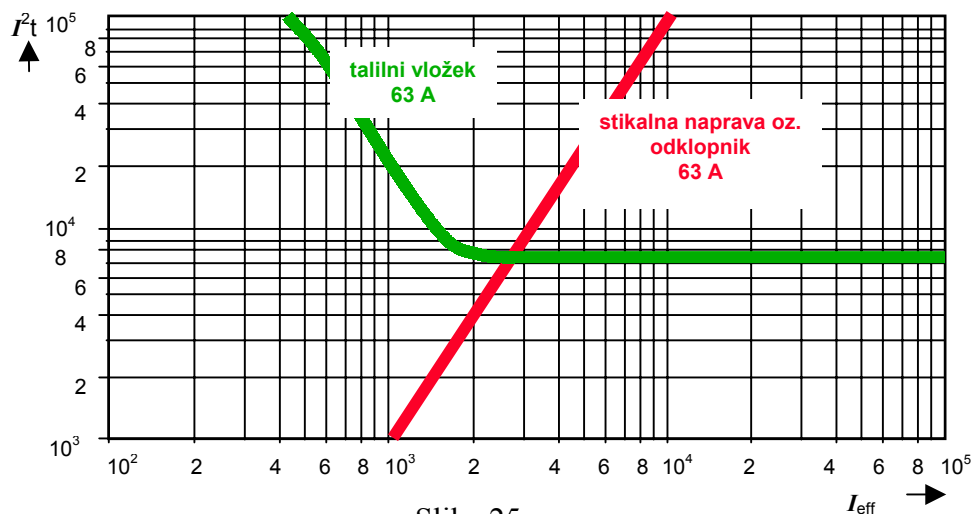
Na drugi strani pa je celotni integral zelo odvisen od dolžine časov zakasnitev. Skratka, čimprej se vzpostavi dovolj visoka obločna napetost, tem manjši je celotni integral. To pomeni da je velikost celotnega integrala v odklopniku odvisna v veliki meri od mehanskih sposobnosti mehanizma ter konstrukcije obločne komore s kontakti.

## 5. DELOVANJE ZAPOREDNO VEZANIH VAROVALK IN ODKLOPNIKOV:

Primerjava delovanja varovalk in odklopnikov v kratkem stiku, predvsem v pogojih naraščajočega pričakovanega toka kratkega stika, nam pokaže naslednje značilnosti:

- Varovalka:
  - o Vrednost integrala se zmanjšuje od vrednosti pri kritičnem toku  $I_2$  pa do vrednosti pri  $I_1$
- Odklopnik:
  - o Vrednost celotnega integrala se linearno dviguje do največjega toka izklopne zmogljivost.

To nam kaže tudi naslednji diagram na sliki 25, ki kaže primerjavo med varovalko in odklopnikom.



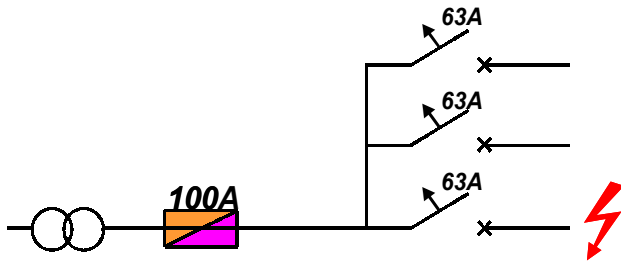
Slika 25

## 6. SELEKTIVNOST TALILNIH VAROVALK IN ODKLOPNIKOV:

Naslednja slika prikazuje primer (slika 26) sheme s predvarovalko 100A in naknadno vgrajene instalacijske odklopnike z nazivnim tokom 63A. Za določitev pogojev selektivnosti potrebujemo podatke o integralih talilnih varovalk in odklopnikov, ki jih vnesemo v diagram, ki je podoben tistemu na sliki 25.

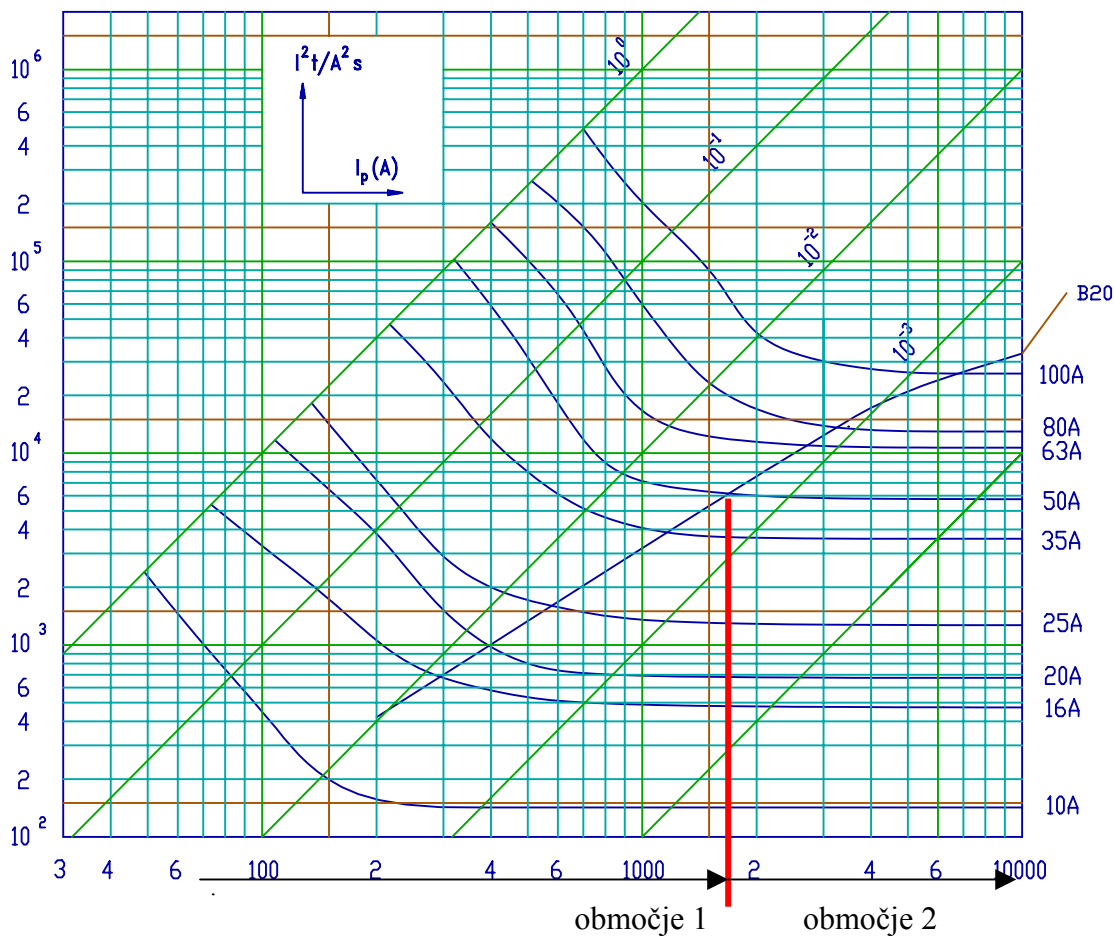
**Izklopno delo:** velja ista definicija kot za varovalke iz poglavja 3.1., torej gre za toplotno energijo, ki se sprosti v odklopniku.

**Izklopni impulz:** pri instalacijskih odklopnikih ne poznamo izraza »talilni integral«, obstaja samo celotni integral.



Slika 26

Na sliki 26 si lahko zamislimo tudi druge ustrezne vrednosti, na primer nazivni tok predvarovalke gG 50A in nazivni tok instalacijskega odklopnika B20A.



Slika 27

Kako odčitamo pogoje selektivnosti?

Najprej poiščemo presečišče krivulje talilnega integrala izbrane varovalke in krivulje celotnega integrala izbranega instalacijskega odklopnika. Če povežemo presečišče in os pričakovanega toka kratkega stika dobimo dvoje območij.

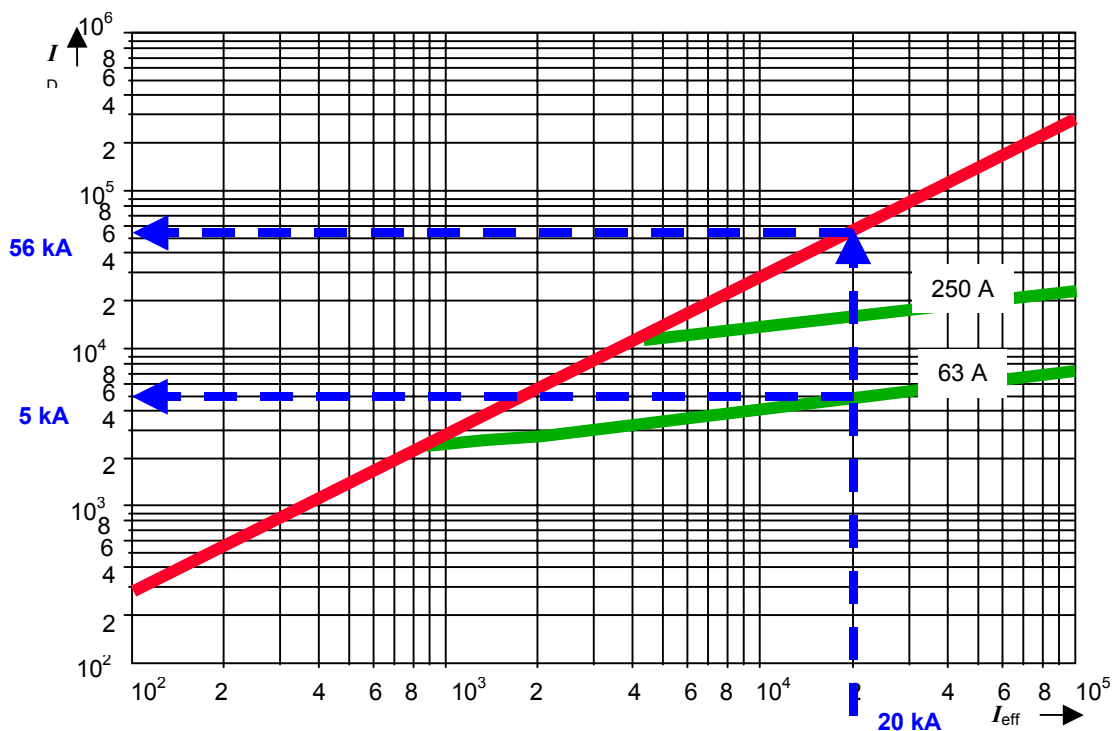
- območje 1: celotni integral instalacijskega odklopnika je manjši od talilnega integrala varovalke, selektivnost je zagotovljena,
- območje 2: celotni integral instalacijskega odklopnika je večji od talilnega integrala varovalke. Selektivnost ni absolutno zagotovljena, v tem primeru bosta izklopila oba zaščitna elementa.

## 7. DIAGRAM ODREZANIH TOKOV:

Dejstvo je, da imajo tako talilna varovalka kot odklopniki sposobnost omejevanja toka kratkega stika še preden bi le-ta dosegel temensko vrednost in povzročil škodo v instalaciji. Naslednja slika 28 prikazuje diagram odrezanih tokov kot način podajanja teh podatkov.

Zakaj je pomembno čim bolj omejiti tok kratkega stika?

Zato, ker previsoka vrednost odrezanega (prehodnega) toka povzroča prevelika dinamična naprežanja vseh elementov instalacije skozi katere teče ta tok. Slika 28 prikazuje primer za talilne varovalke tipa NV, podobni diagrami obstajajo tudi za instalacijske odklopnike, le da z drugačnimi vrednostmi.



Slika 28

Iz diagrama lahko razberemo vrednost odrezanega toka pri 20kA pričakovanega toka kratkega stika efektivne vrednosti. Maksimalna vrednost odrezanega toka znaša 5kA v primeru uporabe NV talilnega vložka z nazivnim tokom 63A.

Enako uporabljamo tudi diagram za instalacijske odklopnike

## 8. ZAKLJUČEK:

Na podlagi ugotovitev v tem članku lahko zaključimo, da je za optimalno zaščito v pogojih visokih kratkih stikov v instalacijah potrebno izkoristiti vse dobre lastnosti tako talilnih varovalk in odklopnikov.

Poleg tega je zelo pomembno poznati prave podatke za posamezne odklopnike, ki so kljub standardizaciji na tem področju lahko od proizvajalca do proizvajalca zelo različni. Od obeh zaščitnih naprav (varovalk in odklopnikov) se pričakuje naslednje:

- čim nižji celotni integral, kar zmanjšuje termično obremenitev instalacije,
- čim nižje odrezane tokove, kar zmanjšuje dimanične obremenitve instalacij.

## 9. VIRI:

- Rieder, Plasma und Lichtbogen, 1967
- H.Johan, Elektrische Schmelzsicherungen fuer Niederspannung, Springer-Verlag 1982,
- M.Lindmayer, Schaltgeraete, 1987
- IEC 60269
- IEC 60898
- Koprivšek, Novosti v elektroinstalacijah- talilne varovalke in odklopniki, Radenci 1998,
- ZVEI, Niederspannungssicherungen,
- ETI d.d., Izlake, tehnični podatki za instalacijske odklopnike in talilne varovalke