

IZKLOP TRIFAZNEGA KRATKOSTIČNEGA TOKA S TRIPOLNIM NIZKONAPETOSTNIM ODKLOPNIKOM

Martin Bizjak

Iskra MIS d. d., Kranj, Slovenija

Ključne besede: nizkonapetostni odklopnik, enopolni odklopnik, tripolni odklopnik, kratkostični tok, izklop trifaznega kratkostičnega toka, tokovna omejitvev izklopa, cepitev na delne obloke

Izvleček: Za izklop velikih tokov, ki nastanejo pri kratkih stikih v energetskih tokokrogih nizke izmenične napetosti, uporabljamo odklopnike. V njih izklopišamo pojav tokovne omejitve, s katerim omejimo tako velikost toka, ki ga izklapljam, kot tudi čas, v katerem doseže ničelno vrednost, kjer lahko tok prekinemo. V enopolnih odklopnikih s tokovno omejitvijo po nastanku kratkega stika napetost na priključkih odklopnika narašča najprej sorazmerno razmikanju kontaktnega para, potem pa hitreje, ko se oblok razširja v obliki zanke v deion komoro. Tam doseže napetost, ki je primerljiva z napetostjo vira, zato se tok hitro zmanjšuje proti ničli in se prekine. Časovni potek napetosti je kvantitativno odvisen od faznega kota nastanka kratkostičnega toka in pogojev v tokokrogu, vendar poteka kvalitativno po funkciji časa, ki je značilna za izklop izmeničnega toka z odklopnikom ali z varovalko na taljivi vložek.

Med izklopom trifaznega izmeničnega toka s tripolnim odklopnikom pa se potek napetosti v kakem od polov lahko bistveno razlikuje od tistega, ki je značilen za enopolni izklopni pojav. Vzrok je v medsebojnem vplivu tokov na sosednjih polov, zaradi česar gibanje obloka povzroča rezultanta sil, ki ga ne usmerja proti deion komori. Zato je kljub porazdelitvi tokov vseh treh faz enakomerno po celi periodi s faznim zamikom po 120° izklop kratkostičnega toka pri nekaterih faznih kotih nastanka kratkega stika težji, kot pri drugih.

Breaking of three-phase short-circuit current by three-pole molded-case circuit breaker

Key words: low-voltage high-current circuit breaker, single-pole MCB, three-pole three-phase MCCB, short-circuit current, breaking of three-phase short-circuit current, break with current limitation, arc splitting

Abstract: Circuit breakers are switching apparatus used to break short-circuit currents. Low voltage circuit breakers operate in short-circuit conditions by applying method of current limitation in order to reduce the magnitude and the duration of let-through current. The break is possible at current zero. The rapid increase of voltage between breaker's terminals, which forces the current rapidly toward zero, is provoked by the lengthening of arc column between opening contacts and forming of an arc loop, which finally enters the arc chutes, reaching voltage comparable to the source voltage. The waveform of voltage increase is typical for breaking events regardless of circuit conditions or even of the methods of current breaking, either by electromechanical circuit breaker or by melting fuse.

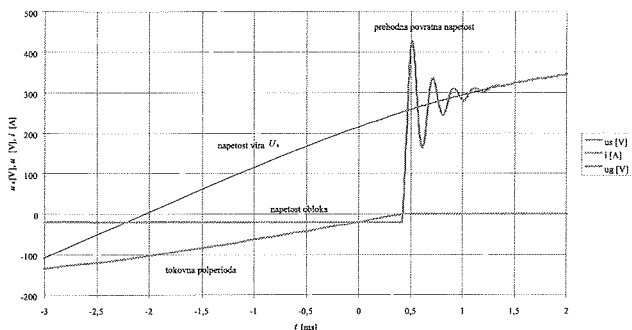
In contrary to breaking of single-phase short-circuit current, at three-phase short-circuit breaking event the voltage waveform of each particular phase does not always follow the typical single-phase one. The sum of influences of currents in the adjacent phases can result on the arc of particular phase in the sense to decelerate them on its way to arc chutes and the current limiting effect can be substantially delayed. Irregardless of uniform distribution of phase angle difference between phases of three-phase currents it is found out, that the conditions of break are harder for circuit-breaker at some specific phase angles of short-circuit event.

1. Uvod

V električnem omrežju imamo za varovanje pred učinki kratkega stika inštalirane odklopnike. Njihova naloga je hitro prekiniti tokovno pot, da ne pride do poškodb tokokroga in naprav, ki so nanj priključene. Odklopnik je stikalo, ki je sposobno izklopiti za več velikostnih redov večji tok, kot v normalnem stanju v tokokrogu. Vgrajeni nadtokovni sprožnik zazna prevelik tok in sprosti mehanizem, da se kontakti glavnega tokokroga stikala fizično razmaknejo. Pri tem pa nastane v režmi med razmikajočimi se kontakti vroč plinski električni »vodnik«, oblok, ki omogoča, da tok še dalje teče po tokokrogu. Izklop je uspešno opravljen, ko med odprtimi kontakti nastali oblok »ugasne«, kar pomeni, da ni več električno prevoden. V nizkonapetostnih energetskih tokokrogih so kontakti stikalnih aparatov v atmosferskem zraku, torej oblok nastane v zraku kot izolacijskem mediju, ki zagotavlja električno ločitev odprtega kontaktnega para.

Večidel obloka izpolnjuje plazma obločnega »stolpca«, svetla električno prevodna sled delno ioniziranega plina, to je v tem primeru zrak, ki ima lastnosti električnega vodnika z neko od temperature odvisno ohmsko upornostjo. Ob kontaktnih površinah pa sta dve prielektrodni plasti, ki sta pri atmosferskem tlaku zelo tanki, reda velikosti 0,01 mm. V prielektrodnih plasteh potekajo procesi ionizacije plinskega medija in rekombinacija ionov v nevtralne osnovne delce plina. Potencialna razlika na anodni in katodni plasti je pri tokih reda 1 kA ali več je reda 10 V. Plazma v splošnem nima ostrih mej z okolico, a pri toku nad 0,5 A zaradi stanja z nižjo energijo kontrahira v omejen volumen »stolpca«, na katerem obstaja napetostna razlika, ki jo določa vsiljeni tok, ki teče skozi obločni stolpec. V prosto gorečem obloku, ki ni omejen s stenami, je potencialna razlika skoraj neodvisna od toka in je kakih 30 V. Le pri zmanjševanju toka pod 1 A potencialna razlika začne strmo naraščati. Stopnja ionizacije plina je eksponentno odvisna od njegove temperature in za oblok v zraku mora tok skozi obločni stolpec

vzdrževati temperaturo več kot 4000 K [1]. Pri dovolj majhnem toku oblok »ugasne«, ker energijski pogoji ne morejo vzdrževati zadostne stopnje ionizacije plina. Pri izklopljanju izmeničnega toka zato pričakujemo, da bo ta ugasnil pri prvem prehodu toka skozi ničlo, ker energijske razmere ne morejo vzdrževati stanja plazme. Prehod v brez-tokovno stanje tokokroga, ki vsebuje ohmsko, induktivno in kapacitivno komponento impedance prikazuje Slika 1.

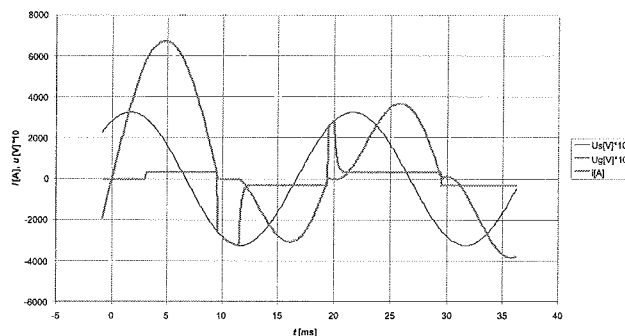


Slika 1: Prekinitev izmeničnega toka v tokovni ničli, simulacija z računskim modelom

Na grafu izklopa je prikazan časovni interval ob izteku ene polperiode izmeničnega toka 50 Hz in napetost na kontaktnem paru, med katerima je oblok s stalno napetostjo 30 V. V trenutku, ko tok i doseže ničlo, oblok ugasne in tok ostane na vrednosti nič, kar pomeni, da je izklop uspešno opravljen. Napetost med kontakti u_g se vrne v napetost vira s prehodnim pojavom dušenega nihanja s frekvenco v redu velikosti nekaj 10 kHz, kot reakcija tokokroga na prekinitve toka.

Tak primer uspešne prekinitve izmeničnega toka v »naravni« ničli tokovne polperiode z enostavnim razmikom (odprtjem) kontaktnega para je pri izklopu velikih tokov zelo redek. Plazma obločnega stolpca ima neko maso in toplotno kapaciteto, na mejni plasti odvaja v okoliški zrak toploto, večidel pa izseva svetlobo. Zato se oblok odziva na spremembo zunanjih pogojev z neko časovno konstanto, ki je reda velikosti $\epsilon_s / 2$. V trenutku prehoda toka skozi ničlo je lahko temperatura plazme še tolikšna, da je v začetku naslednje tokovne polperiode oblok še dovolj električno prevoden, kar omogoči ponoven razvoj obloka. Ponovni vžig obloka po kratkotrajni ugasnitvi imenujemo »povratni vžig« obloka. Pojav je prikazan na Sliki 2, kjer po prehodu skozi ničlo tok za kratek čas preneha teči, a začne ponovno naraščati pri neki manjši napetosti med kontakti, ki se pri povratnem vžigu sesede na raven obločne napetosti. Vsak zaporedni povratni vžig nastane pri manjši napetosti, dokler tok oblok niti v tokovni ničli tudi za kratek čas ne ugasne. Povratni vžig je seveda uničujoč tako za odklopnik kot tudi za komponente tokokroga, ki naj bi jih varoval.

Povratek v električno prevodno stanje lahko povzročijo tudi velike napetostne amplitude prehodnega pojava, ko se kontakti šele razmikajo in je napetostna trdnost med njimi manjša, kot v odprti legi. Če amplituda prehodne pov-



Slika 2: Zaporedje povratnih vžigov v sledečih polperiodah izmeničnega toka, simulacija z računskim modelom

ratne napetosti preseže izolacijsko trdnost plina med odpirajočimi kontakti, se razelektritev »vžge« na dielektrični način. Tudi to privede v povratni vžig obloka.

Pri izklopu kratkostičnega toka reda nekaj kA se v eni sami polperiodi izmeničnega toka (10 ms) lahko sprosti nekaj MJ toplote, kar termično zelo obremenjuje odklopnik in lahko preseže njegovo termično vzdržljivost. Izklopna zmogljivost odklopnika je podana z velikostjo razpoložljivega toka (prospective current), ki ga lahko daje vir pri dani napetosti v tokokrog brez odklopnika, ki pa ga je ta sposoben uspešno izklopiti in ostati pri tem sposoben opravljati osnovne stikalne funkcije. Pomemben podatek za izklop je jouski integral pri izklopu prepuščenega toka, to je integral i^2 po času v intervalu od nastanka kratkega stika do prekinitve kratkostičnega toka. Sodobni odklopniki za nizkonapetostne energetske tokokroge uspejo skrajšati tokovni interval na čas, ki je manj od ene polperiode izmeničnega toka, in amplitudo prepuščenega toka I_D za precej manj, kot jo omeji impedanca stikala. To dosežemo z metodo »tokovne omejitve« izklopnega toka, kjer med izklopom naraste napetost na priključkih odklopnika u_g na 1,5-kratnik do 2-kratnik napetosti vira. Učinek je načelno opisan z (1), kjer pri kateri koli impedanci Z v tokokrog z zmanjšanjem razlike med napetostjo u_g in napetostjo vira u_s omejimo tok i , ki v tokokrogu doseže vrednost 0 takrat, ko sta obe napetosti izenačeni:

$$i Z(R, L, C) = u_s - u_g \quad (1)$$

Obstaja nekaj načinov, kako povečati napetost med kontakti u_g s povečanjem potencialne razlike na obloku.

Če oblok stisnemo na majhen presek v kanal ali v režo s toplotno dobro prevodnimi stenami, mu zmanjšamo električno prevodnost, zato se mu pri danem toku poveča njegova napetost. Upornost obloka R_{oblok} v splošnem povečamo s podaljšanjem ali zoženjem obločnega »stolpca«, ter z zmanjšanjem električne prevodnosti medija, kot velja splošno za električni vodnik. V nizkonapetostnih odklopnikih je razmak med kontakti reda velikosti do 10 mm, kar predstavlja začetno dolžino obločnega stolpca, z oblikovanjem v zanke in zavoje ga lahko precej podaljšamo, a samo s tem obločne napetosti ne povečamo na željeno vrednost. Večji učinek nudi stisnjenje obloka v ozek kanal,

kar s pridom izkoriščamo v talilnem vložku varovalke /3/, stiskanje obloka med odpiranjem kontaktov v ozko špranjo z zaslonom, ki ga poganja mehanizem odklopnika, pa se zaradi počasnosti mehanizma ni izkazal kot upoštevanja vredna alternativa sedaj uporabljenim načinom /4/. Učinkovito pa je vodenje obloka po kovinskih letvah z Biot-Savartovo silo na tokovno zanko obločnega »stolpca«, vendar ga zaradi magnetohidrodinamskih zakonov ne moremo enostavno stlačiti v poljubno ozko režo. Lahko pa ga speljemo med kovinske ploščice »deion« komore, kjer ga razdelimo na več zaporednih delnih oblokov. Napetost razsekanega obloka znatno naraste, čeprav se mu skupna dolžina ne poveča. Vsak delni oblok, ki je umeščen med dve plošči »deion« komore, ima svojo anodno in katodno plast z ustrezno anodno in katodno napetostjo. Vpliv dolžine obločnega stolpca delnega obloka je zanemarljiv, zato je razmak med ploščami deion komore majhen, od 1 mm do 2 mm. Obločna napetost U_{oblok} v zraku med jeklenima ploščama z razmikom za nekaj mm je podana z (2) in praktično neodvisna od toka /5/:

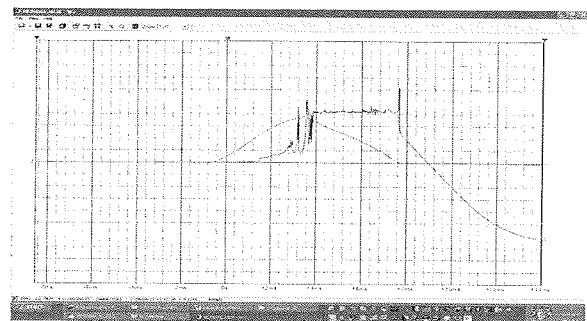
$$U_{oblok} [V] = 18,5V + 2,25V/mm \cdot d [mm] \quad (2)$$

kjer je konstantni člen vsota obeh prielektrodnih napetosti, drugi člen pa vsebuje gradient napetosti v obločnem stolpcu. Čeprav ta zavzema skoraj vso dolžino med ploščama, k napetosti obloka največ doprinesejo tanke prielektrodne plasti. Jeklo je zaradi svojih feromagnetnih lastnosti pogosto uporabljen material za »deion« komore. Celotna potencialna razlika med koncema obloka, ki je razdeljen med N kovinskih plošč na N+1 zaporednih delnih oblokov, je $U_{oblok} = (N+1) \cdot 25$ V. Število plošč N načelno navzgor ni omejeno, vendar je praktična zgornja meja za N ta, da naj bo $1,5 < U_{oblok} < 2 U_s$. V komoro z velikim številom plošč je oblok težko spraviti dovolj hitro in ga držati v njej dovolj dolgo.

2. Potek izklopa enofaznega toka v enopolnem odklopniku za izmenični tok nizke napetosti

Izklop kratkostičnega toka ene faze zadovoljivo opravi enopolni odklopnik. To pomeni, da izklapljammo tok v enem tokokrogu z enim sklopom sprožnika, kontaktov in deion komor. Današnji enopolni odklopniki večidel izkoriščajo način izklopa z učinkom tokovne omejitve in dosegaajo izklopno zmogljivost do 10 kA pri napetosti vira 230 V. Hkrati je odločilno, da je odklopnik v primeru kratkega stika čim hitreje zaznati prevelik tok in razmakniti kontaktne dele kontaktnega para v varovanem tokokrogu. V ta namen izkoriščamo učinek odskoka kontaktov (blow-off) zaradi odpiralne sile toka skozi kontaktno mesto /6/ in sunek udarne kotve na odpiralni kontaktni del, ki jo pospešimo z magnetnim poljem izklopnega toka skozi tuljavo nadtokovnega sprožnika, katerega naloge je zaznati prevelik tok in sprožiti razmaknitev kontaktov. Zaželeno je doseči začetno odpiralno hitrost kontaktov vsaj 5 m/s. V trenutku fizičnega odmika kontaktov napetost obloka takoj naraste na minimalno vrednost U_{oblok} , ki znaša od 10 V do 12 V, in nar-

ašča sorazmerno z razmakom kontaktnega para. Vsak od kontaktnih delov ima podaljške oblikovane v »rogove«, ki olajšajo obloku oblikovanje v zanko in njeno širjenje zaradi Biot-Savartove sile, pa tudi približevanje ploščam deion komore. Ta razvoj obloka traja nekaj ms in U_{oblok} doseže vrednost do 100 V. Tok i , ki je naraščal skoraj po sinusoidi izmeničnega toka, doseže na koncu te faze izklopa svojo konično vrednost I_D . Oblok se nahaja pred vstopom v deion komoro oblok in U_{oblok} hitro narašča, ko se začne proces delitve na delne obloke. To ne uspe vedno v enem koraku, večkrat se vrne v prostor pred komoro in ponovno vstopi med plošče. Ko je oblok dokončno razdeljen na delne obloke, je njegova napetost neodvisna od trenutnega toka in stalna. Na Sliki 3 je prikazan oscilogram napetosti med priključki enopolnega odklopnika, ki je približno enaka poteku obločne napetosti. Začetnemu počasnejšemu naraščanju napetosti, ko je oblok še med kontakti, sledi hitrejše naraščanje v fazi podaljševanja obloka v zanko in strm dvig, ko vstopa v deion komoro in se deli na delne obloke. Vstop uspe še le v treh korakih, kar se vidi iz treh napetostnih konic pred segmentom, ko napetost dokončno doseže kakih 400 V in drži to vrednost. Medtem pa se tok i strmo spušča od I_D proti vrednosti $i = 0$. Vrednost i je ostala v ničli in napetost je z U_{oblok} prešla na potek napetosti vira u_s , kar pomeni, da je oblok ugasnil. Prekinitev toka je bila uspešna in izklop je opravljen. Izklopne količine, kot je čas trajanja izklopa t_{izkl} , I_D in jouski integral (integral $i^2(t) dt$ od pojava kratkega stika do t_{izkl}), so odvisne od tega, v katerem tokovnem faznem kotu je bil izklop začel, vendar je časovni potek napetosti po teh fazah izklopa značilen za izklop izmeničnega toka z enopolnim odklopnikom. Potek izklopa je pri drugem faznem kotu tokovne sinusoide in pri drugih parametrih tokokroga kvalitativno identičen prikazanemu poteku izklopa, tudi če je izklop opravljen z drugačnim tipom odklopnika ali s taljivo varovalko.



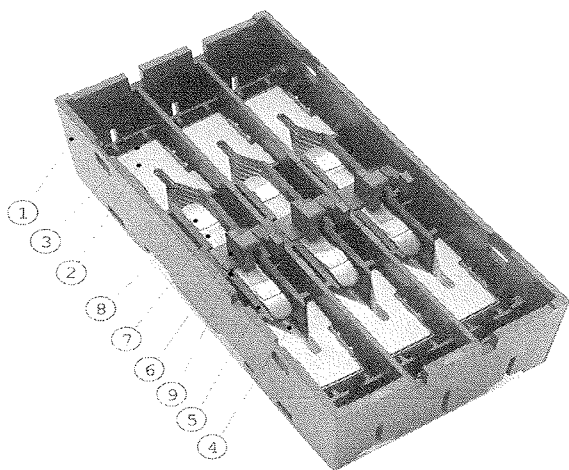
Slika 3: Oscilogram izklopa enopolnega odklopnika, preskusni enofazni tok 3 kA pri 230 V

3. Izklop trifaznega toka v tripolnem nizkonapetostnem odklopniku

Večpolni odklopnik ima priključke za izklop več neodvisnih tokokrogov. Vsak polu ima svoj lasten sistem zaznavanja prevelikega toka in stikalni sistem za izklop s tokovno ome-

jitvijo. Skupen za vse pole je le vklopno-izklopni mehanizem. Vsi poli, ki so namenjeni za priključitev posameznih faz, imajo identično zgradbo in način delovanja, le pol za nevtralni tokokrog (če ga odklopnik ima) se po zgradbi lahko razlikuje od polov za posamezne fazne tokokroge. Poli odklopnika so električno vezani vzporedno in tudi prostorsko razmeščeni vzporedno drug ob drugem. Medsebojno so izolirani s pregrado iz izolacijskega materiala.

Primer razporeditve polov za posamezne fazne tokokroge v odklopnika za trifazni sistem prikazuje Slika 4. Prikazana je izvedba kontaktno-obločnega sistema z dvojnimi parovi kontaktov, ki dvakrat prekinjata tokokrog posameznega pola. Na sliki je videti le giblivi kontaktni del z dvema kontaktnima mestoma in ob vsakem kontaktnem paru deion komoro, zaradi dvojne prekinitve ima odklopnik v vsakem polu po dve komori.

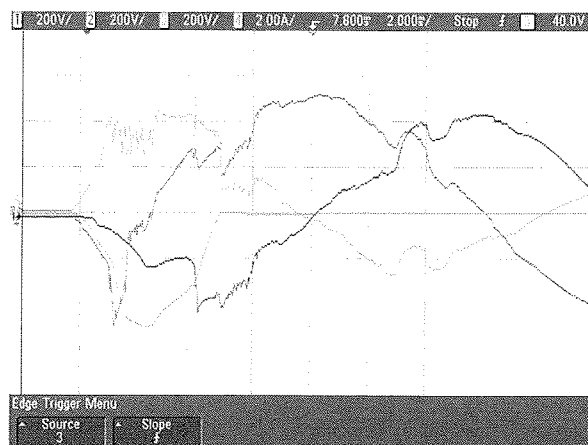


Slika 4: Razpored polov tripolnega odklopnika za izklop trifaznega tokokroga nizke napetosti

Izklop trifaznega toka ima v primerjavi z izklopom toka ene faze nekaj posebnosti. Kot faznega zaostanka med napetostmi in tokovi v posameznih fazah pri simetričnem bremenu je 120° . V primeru hkratnega nastanka kratkega stika v vseh treh fazah, kot pri preskusih kratkostične izklopne zmogljivosti odklopnika, sinhroniziramo trifazni kratki stik pri izbranem vklopnem faznem kotu na eni od faz, npr. v L1. V trenutku vklopa preskusnega vira kratkostičnega toka tok v vsaki fazi narašča zvezno od nič, potek pa je zaradi faznega zaostanka med fazami L1, L2 in L3 v vsaki fazi drugačen in odvisen od trenutka vklopa vira in impedance tokokroga. Zmogljivost preskusnega vira omogoča nastaviti razpoložljivi tok I_p na 50 kA pri 400 V medfazno. Z bremenskim uporom in dušilko nastavimo želeni tok in faktor moči (kosinus kota fazne difference med tokom in napetostjo) v vsaki fazi. Preskusi kratkostične izklopne zmogljivosti potekajo v specializiranih preskuševališčih po zahtevah standardov IEC 60947.

Ko s sinhronskim stikalom v izbranem trenutku v vseh treh fazah (L1, L2 in L3) vklopimo nastavljeni kratkostični tok I_p , odklopnik samodejno opravi izklopni manever. Pri tem osciloskopsko spremljamo potek napetosti in toka v vsaki od

faz in ugotavljamo uspešnost izklopa (eventualen nastanek povratnega vžiga), učinek omejitve toka, če pa ima register hitrih pojavov dograjene matematične funkcije, pa še integral i^2 v času trajanja izklopa. Iz posnetih oscilogramov se da razbrati tudi obnašanje obloka med izklopom. Slika 5 prikazuje oscilogram izklopa trifaznega toka s tripolnim odklopnikom, ki ima v vsakem polu kontakte za dvojno prekinitve tokokroga.

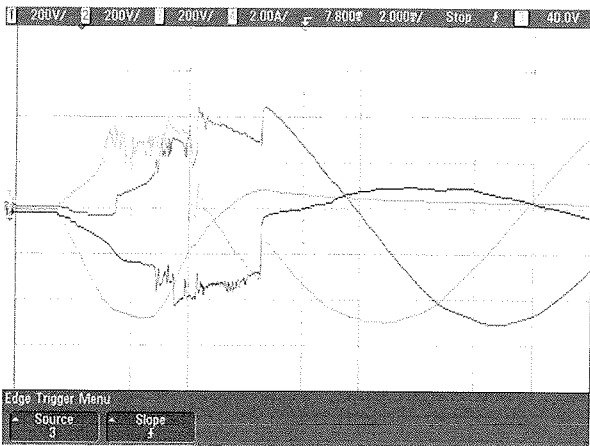


Slika 5: Oscilogram izklopa trifaznega toka 25 kA pri 400 V

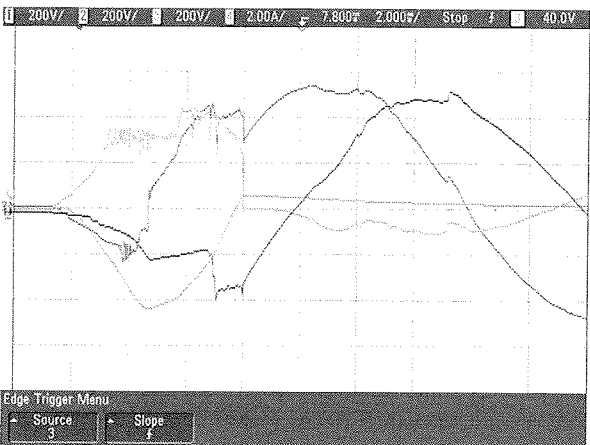
Napetost vira je bila 420 V medfazno, nastavljeni razpoložljivi tok I_p pa v vsaki fazi 25 kA. Faktor moči je bil nastavljen z dodatno zračno dušilko, da simulira induktivno breme. Za bremenom so bili fazni vodniki povezani v zvezdišče brez priključitve na nevtralni vodnik N. V takem primeru se tok vedno prekine najprej v eni fazi, v ostalih pa je tok po velikosti enak in nasprotno polaritete. Zato prekinitvev toka v teh dveh fazah nastane hkrati.

Učinek tokovne omejitve v enem polu je določen s časovnim potekom napetosti na priključkih tega pola, tega pa večidel določa potek napetosti obloka. Na polu, ki prvi prekine tok, je potek napetosti u_g podoben temu pri izklopu enopolnega odklopnika (primerjaj z oscilogramom na Sliki 3). V enem od ostalih dveh polov tok v začetku narašča sorazmerno počasi, kar je pogojeno z vklopnim faznim kotom toka v tem polu, zato se tudi kontakti razmikajo počasneje. Obločna napetost narašča počasneje in trenutek vstopa obloka v deion komoro je kasnejši. Največja vrednost u_g je kakih 400 V, ko ta doseže stalno vrednost pred prekinitvijo toka. Čas trajanja izklopa je 5 ms do 6 ms od nastanka kratkega stika. Ta čas določa pol, na katerem u_g narašča najpočasneje. Potek napetosti na tem polu se razlikuje od tistega, ki je značilen za enopolni izklop: v začetku napetost narašča tako, kot narašča obločna napetost med razmikajočimi se kontakti in doseže približno 100 V na kontaktni par, potem pa njen dvig kaže zastoj, saj se ji vrednost za kake 2 ms ne spremeni. Šele potem se dvigne proti 400 V, kar kaže na vstop obloka v deion komoro in delitev na delne obloke. Primerjava med potekom napetosti u_g na obeh polih, v katerih je tok prekinjen nazadnje, kaže na medsebojni vpliv sosednjih faz. Biot-Savartova sila

na tokovno zanko ne deluje samo na večanje zanke obločnega stolpca v enem polu, ampak v sosednjem polu izriva oblok stran od deion komore zaradi istega učinka povečevanja tokovne zanke. Ker medsebojno vplivajo drug na drugega vsi trije poli, je potek u_G v L1, L2 in L3 odvisen od izbranega vklopnega faznega kota kratkostičnega toka. Izklopni pojav pri vklopnem faznem kotu 0° vira preskusnega toka v L1 je prikazan na oscilogramu Slike 6a, pri faznem kotu 30° v L1 pa na Sliki 6b.

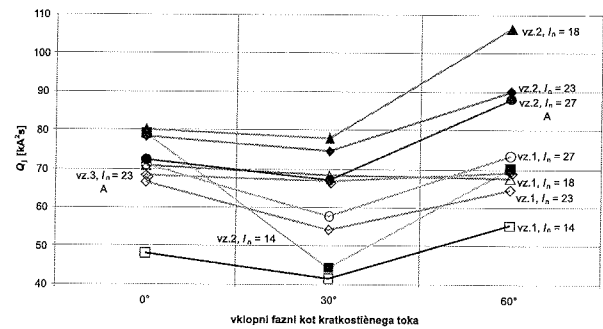


Slika 6a: Izklop trifaznega toka z začetkom pri faznem kotu 0°



Slika 6b: Izklop trifaznega toka z začetkom pri faznem kotu 30°

Posledica interference tokov med poli je, da pri nekem vklopnem faznem kotu kratkostičnega toka odklopnik teže izklopi. Merilo za oceno, koliko je izklop blizu zmogljivosti odklopnika, je izklopni integral I^2 po času t v trajanju izklopa. Za nekaj različnih tripolnih odklopnikov istega tipa je bil med preskusom izklopa trifaznega toka kratkega stika $I_p = 25$ kA pri 400 V medfazno izmerjen izklopni integral in ugotovljena njegova največja vrednost, pri čemer so bili izbrani trije različni vklopni fazni koti: 0° , 30° in 60° . Rezultati so prikazani na grafu Slike 7: največje vrednosti izklopnega integrala najverjetneje nastopajo pri kotu 60° .



Slika 7: Joulski integral izklopa pri različnih faznih kotih začetka preskusnega toka

4. Sklep

V večpolnem odklopniku se med izklopom velikih tokov pojavlja interferenca med poli, zaradi česar je izklop toka v enem od zadnjih polov, v katerem se tok prekine, otežen. Interferenca se izraža kot oviranje gibanja obloka zaradi magnetnih učinkov toka sosednjega pola. Zato kasneje vstopi v deion komoro in kasneje doseže predvideno napetost, ki zagotavlja učinek tokovne omejitve. Ker nastopa interferenca med vsemi tremi poli odklopnika, odločujoča pa je v času trajanja ene polperiode izmeničnega toka, je njen učinek na izklop odvisen od razporeditve toka po vseh polih in njegovega časovnega poteka v času trajanja izklopa. Oboje pa je odvisno od faznega kota nastanka kratkega stika. Zato je težavnost izklopa za odklopnik odvisna tudi od tega kota.

5. Literatura

- /1/ J. M. Yos: *Transport properties of nitrogen, hydrogen, oxygen and air to 30 000 K*, Techn. Memorandum RAD-TM-63-7, AVCO Corp., Mass., 1963
- /2/ N. Reimann: *Das Stromnulldurchgang-Verhalten von Niederspannungs-Schaltlichtbögen unter Berücksichtigung von Kathoden-schicht und dynamischer Bogensäule*, disertacija, Technische Universität Carolo-Wilhemina, Braunschweig, 1987
- /3/ M. Bizjak, P. Žunko, S. Poberaj: *Characteristics of arc in melting fuse element filled with quartz sand*, Mediterranean Electrotechn. Conf. MELECON 91, Ljubljana, 1991, pp. 1493-1496
- /4/ E. M. Belbel, M. Lauraire: *A new breaking technology independent from the contact material*, 13th Internat. Conf. On Electric Contacts, Lausanne, 1986, pp. 150-155
- /5/ H. Klepp: *Über den Einfluss der Löschkammerkonstruktion auf die Lichtbogenlöschung in Schützen gröser Nennstromstärken*, disertacija, Technische Universität Carolo-Wilhemina, Braunschweig, 1982
- /6/ M. Bizjak, S. N. Kharin, H. Nouri: *Influence of vapour pressure on the dynamic of repulsion by contact blow-off*, Proc. 21st Intern. Conf. On Electrical Contacts, Zurich, Switzerland, 2002, pp. 268-275

dr. Martin Bizjak, univ. dipl. ing fizike
R&R, Iskra MIS, d. d, Ljubljanska cesta 24a, 4000 Kranj,
e-mail: martin.bizjak@iskra-mis.si