

ANALIZA POJAVA U MREŽI 6 kV PRI RAZVLAČENJU ELEKTRIČNOG LUKA

Dragan Ristivojević, dipl. el. ing,
Zoran Milosavljević, el. tehn.

RB „Kolubara – Površinski kopovi Baroševac“ Sv. Save 1, Lazarevac

Zakovitosti uključenja i isključenja struje, pokazuju da je električni luk jedna od fizičkih osnova delovanja i funkcionisanja prekidača. Samim tim postizanje optimalnih karakteristika prekidača zavisi od poznavanja svojstava električnog luka, kako bi se odgovarajućom konstrukcijom iskoristile prednosti i na neki način ograničila štetna dejstva. Eksperimentalna istraživanja su veoma složena, tako da mnoga pitanja iz teorije električnog luka nisu u dovoljnoj meri razjašnjena, bez obzira na skoro 200 godina rada na ovoj problematici.

Izolovana 6 kV-tna električna mreža je veoma složena i interesantna s aspekta vrednosti kapacitivnih struja, koje nisu visoke i samim tim su uzrok nastanka samogašenja električnog luka. Smatra se da samogašenje postoji do vrednosti zemljospoja, (uključiv i više harmonike) oko 300A. Dosta je podeljeno mišljenje medju stručnjacima iz ove oblasti, tako da se mnogi ne slažu sa iznetim podatkom, već smatraju da je konfiguracija mreže od presudnog značaja za nastanak samogašenja električnog luka i njegov prelazak u stanje stabilnog. Pri samogašenju, takozvanoj intermitenciji, nastaju prenaponi u električnoj 6 kV-tnoj mreži zbog prekidanja i uspostavljanja strujnog kola ($L di/dt$). Oprema se dodatno napreže, a već oštećena mesta na kablovima u pogledu vrednosti otpora izolacije, postaju potencijalne zone višestrukih kvarova. S druge strane pri samogašenju električnog luka, mesta kvara nisu u velikoj srazmeri oštećena i lakše je izvršiti sanaciju.

Propis za sada ograničava vrednost struje zemljospoja u izolovanim 6kV-tnim mrežama na 30A. Ova veličina se može izmeriti upotrebom adekvatnog strujnog transformatora i ampermetra, a može se i izračunati prema upotrebnoj dužini kablova ili vazdušnih vodova.

$$I_c = 3U_f \cdot \omega \cdot c \cdot l(\text{km}) \quad (\text{A}) \quad [1]$$

Gde je:

$$U_f \quad - \text{vrednost faznog napona} \quad \frac{Ul}{\sqrt{3}}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad - \text{kružna učestanost}$$

C - podužna kapacitivnost (nF)

l – dužina kablovske, ili vazdušne mreže (km)

U praksi se koriste sledeće jednačine:

Za kablovsku mrežu:

$$I_c = \frac{1}{6} U l \cdot (kV) \cdot l(km) \quad (A) \quad [2]$$

Za vazdušnu mrežu:

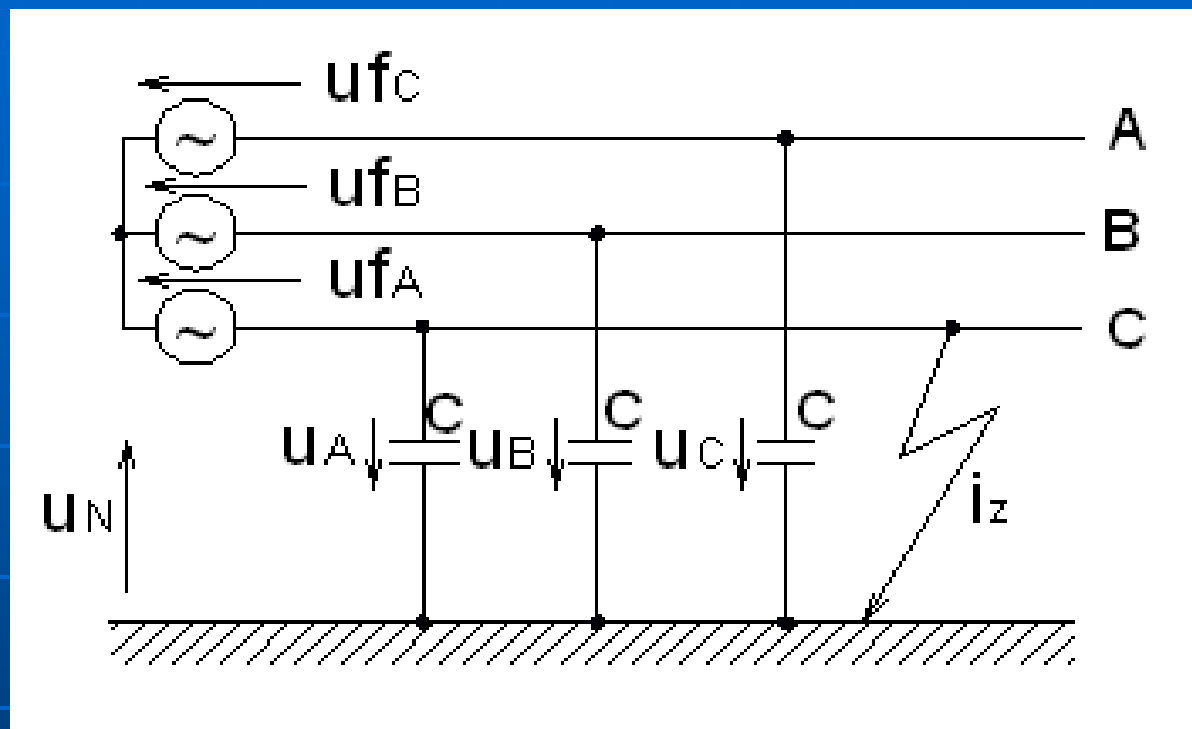
$$I_c = \frac{1}{350} U l \cdot (kV) \cdot l(km) \quad (A) \quad [3]$$

Dobijaju se približne vrednosti struje zemljospoja, za empiriju sasvim zadovoljavajuće. Električni luk ima ulogu komutatora, koji uzima u obzir kapacitivnost "kvarne" faze u odnosu na zemlju, a u sledećem momentu je eliminiše (tzv. intermitencija). Gašenje i paljenje električnog luka izaziva složene prelazne procese čiji intenzitet zavisi od karakteristika luka, dozemnih i medjufaznih kapacitivnosti, induktivnosti u konzumu, otpornosti kola kvara, itd. Može se primetiti da je proučavanje uticaja svih faktora, koji imaju udela pri prelaznom procesu, pri intermitentnim zemljospojevima jako složen zadatak. Trenutno, za složene fizičke pojave, vezane za nastajanje električnog luka ne postoje strogo definisani analitički izrazi.

Inače, uopšte procesi koji nastaju pri intermitentnim zemljospojevima, ne mogu se opisati prostim matematičkim jednačinama. Zbog nedostatka podataka o zakonitosti promene struje i napona, javljaju se teškoće oko uspostavljanja potrebnih i efikasnih mera zaštite električne mreže od prenapona nastalog dejstvom luka pri zemljospoju.

Prva ispitivanja lučnih prenapona, nastalih usled prelaznih procesa, izvršena su početkom 20.-og veka, i počela su od g-dina Petersena. U svojim teoretskim razradama, oslanjao se na eksperimentalne podatke i oscilografska posmatranja, i intuitivno se približio objašnjenju mehanizma nastanka prenapona. Ne držeći se strogo naučnog objašnjenja analize, Petersen opisuje obrazovanje potencijala, na osnovu čega se povisuje opšti potencijal mreže. Oscilacije visoke učestanosti, koje se obrazuju pri svakom gašenju i ponovnom uspostavljanju intermitentnog luka, dovode do razvoja kumulativnog procesa nastanka prenapona. Pri tome, amplituda visokofrekventih oscilacija dostiže maksimum. U celini sva teoretska postavka, javljanja mehanizma obrazovanja lučnog prenapona po Petersonu nosi epitet hipoteze. Prirodno da se pri takvom nivou, izložena teorija ne može smatrati savršenom, niti predstavljati sigurnu osnovu za razmatranje pojave lučnih prenapona, i preduzimanje mera zaštite posebno u savremenim, snažnim elektroenergetskim sistemima.

Bilo je pojedinačnih mišljenja da u obrazovanju prenapona pri zemljospojevima preko električnog luka na mestu kvara u mreži. Medjutim, ta teorija, zbog nedostatka matematičkog aparata pri izučavanju razmatranih kvarova el.energetskog sistema ne objašnjava suštinu obrazovanja prenapona usled luka i ostavlja otvoreno pitanje njihovog nastanka. Prema poznatoj polaznoj hipotezi Petersena, luk se gasi pri prolasku struje kroz nulu i uspostavlja pri dostizanju maksimalne vrednosti napona. Razmatrani režim periodičnog gašenja i uspostavljanja luka , vrši se u toku svake poluperiode. Intermitentni luk svaki put izaziva složene prelazne procese. Razmatrajmo simetričnu trofaznu mrežu sa izolovanom neutralnom tačkom.



Slika1. Šema idealizovane mreže pri jednofaznom zemljospoju

Razmotrimo ponašanje takve mreže pri jednofaznom zemljospoju preko luka, npr. u fazi **A**. Smatraćemo da je prvi spoj nastao u momentu $t = 0$, kada napon faze, prema zemlji, ima maksimalnu vrednost. Promena faznih napona izvora napajanja mreže:

$$\mathbf{U}_{f_A} = Umf \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); \quad [4]$$

$$\mathbf{U}_{f_B} = Umf \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}); \quad [5]$$

$$\mathbf{U}_{f_C} = Umf \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}); \quad [6]$$

Neposredno pre spoja faze **A** sa zemljom, tj. pri $t = (-0)$, naponi faza **A**, **B** i **C** prema zemlji imaju vrednost:

$$\mathbf{U}_A(-0) = U_{mf}; \quad [7]$$

$$\mathbf{U}_B(-0) = \mathbf{U}_C(-0) = -0,5 U_{mf} \quad [8]$$

U intervalu vremena od $\omega t = 0$, do $\omega t = \pi$ (nazovimo ga prvim intervalom), struja zemljospoja, menja se po zakonu:

$$i_Z = 3U_{mf}\omega C \sin(\omega t + \pi) \quad (9)$$

a napon neutralne tačke u_N , jednak je naponu faze **A**. Saglasno hipotezi Petersena, luk se gasi pri prolasku struje zemljospoja kroz nulu. Taj slučaj je pri $\omega t = \pi$ (slika 2). Kapacitivnost faze u kvaru nije opterećena strujom luka, čija otpornost je smatramo nula (∞). Nastaje trenutna preraspodela napona na kapacitivnostima mreže prema zemlji. Napon neutralne tačke u sledećem intervalu, tj. pri $\pi \leq \omega t \leq 3/2 \pi$, nalazimo da je :

$$u_N = u_{mf} \quad (10)$$

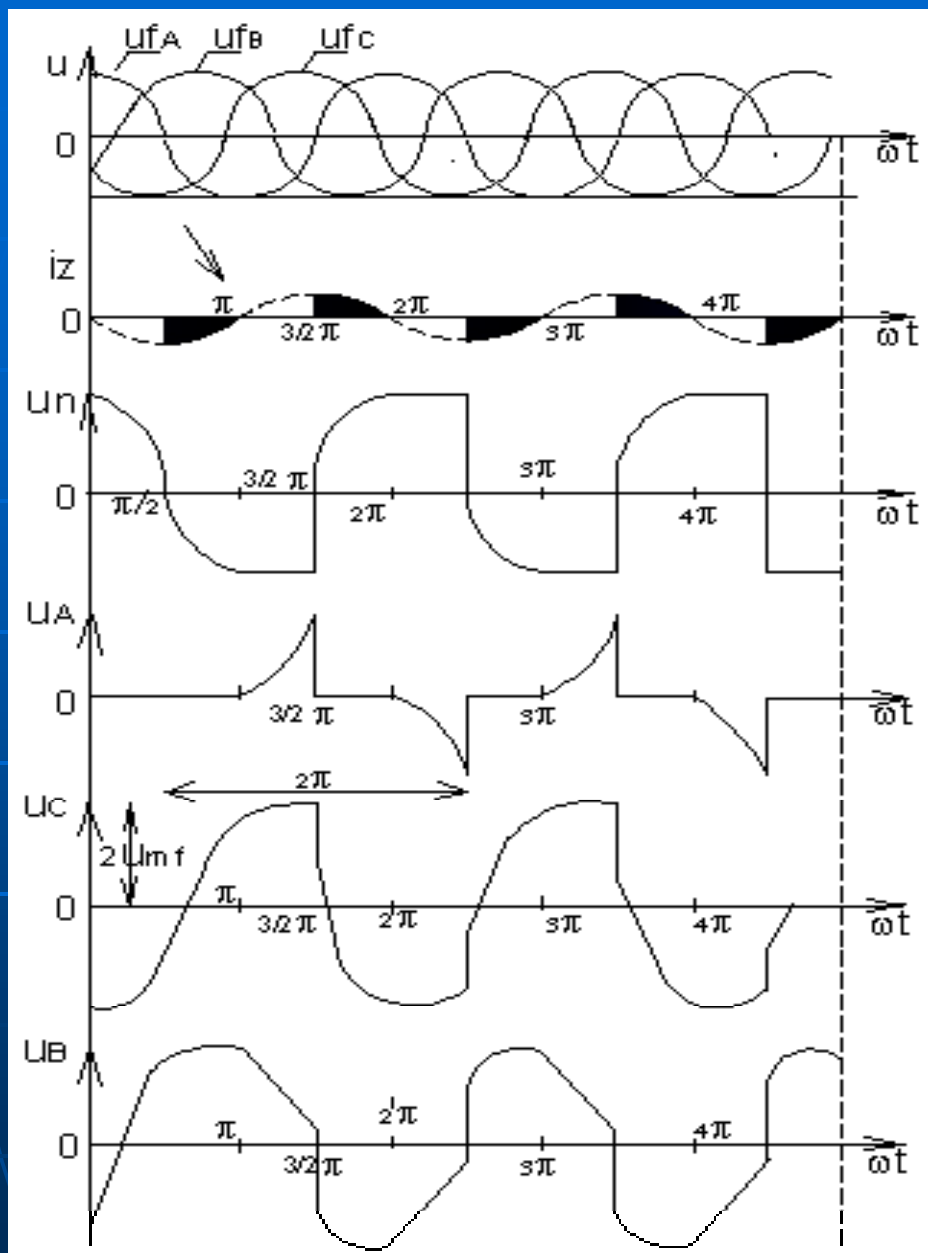
Sledi da je nulta tačka trofaznog izvora, prema zemlji, posle gašenja luka, na vremenski promenljivom potencijalu jednakom po vrednosti amplitude faznog napona mreže. Zato se napon u mreži, u intervalu gašenja luka može odrediti izrazima:

$$\mathbf{u}_A = Umf[\sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) + 1]; \quad [11]$$

$$\mathbf{u}_B = Umf[\sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}) + 1]; \quad [12]$$

$$\mathbf{u}_C = Umf[\sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}) + 1]. \quad [13]$$

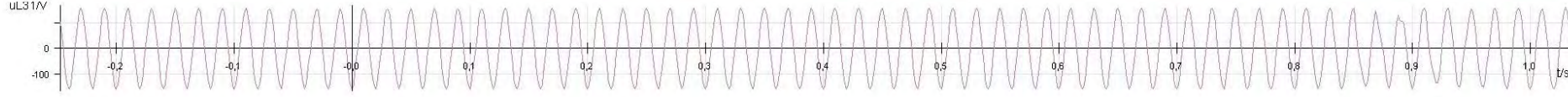
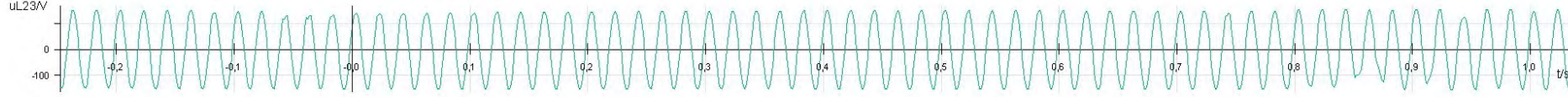
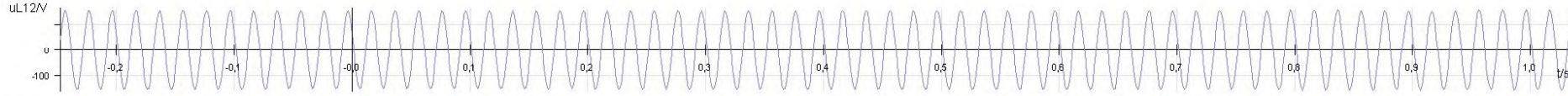
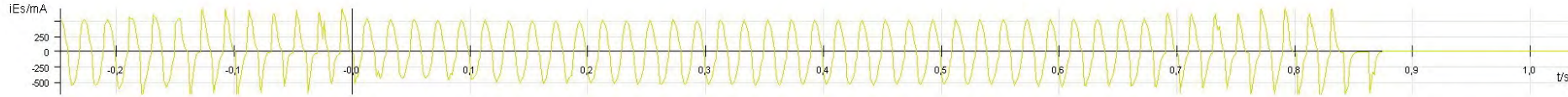
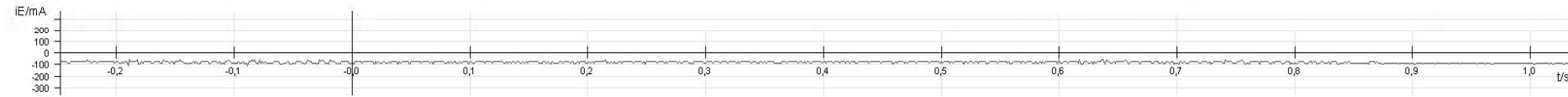
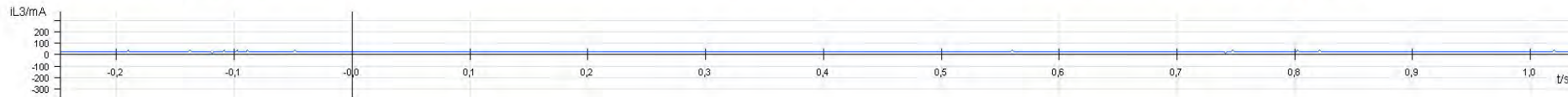
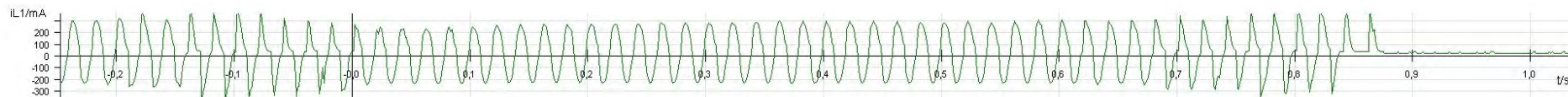
Fazni naponi prema zemlji, mogu dostići vrednost, jednaku dvostrukoj amplitudi faznog napona mreže, odnosno **$2Umf$** (slika 2).

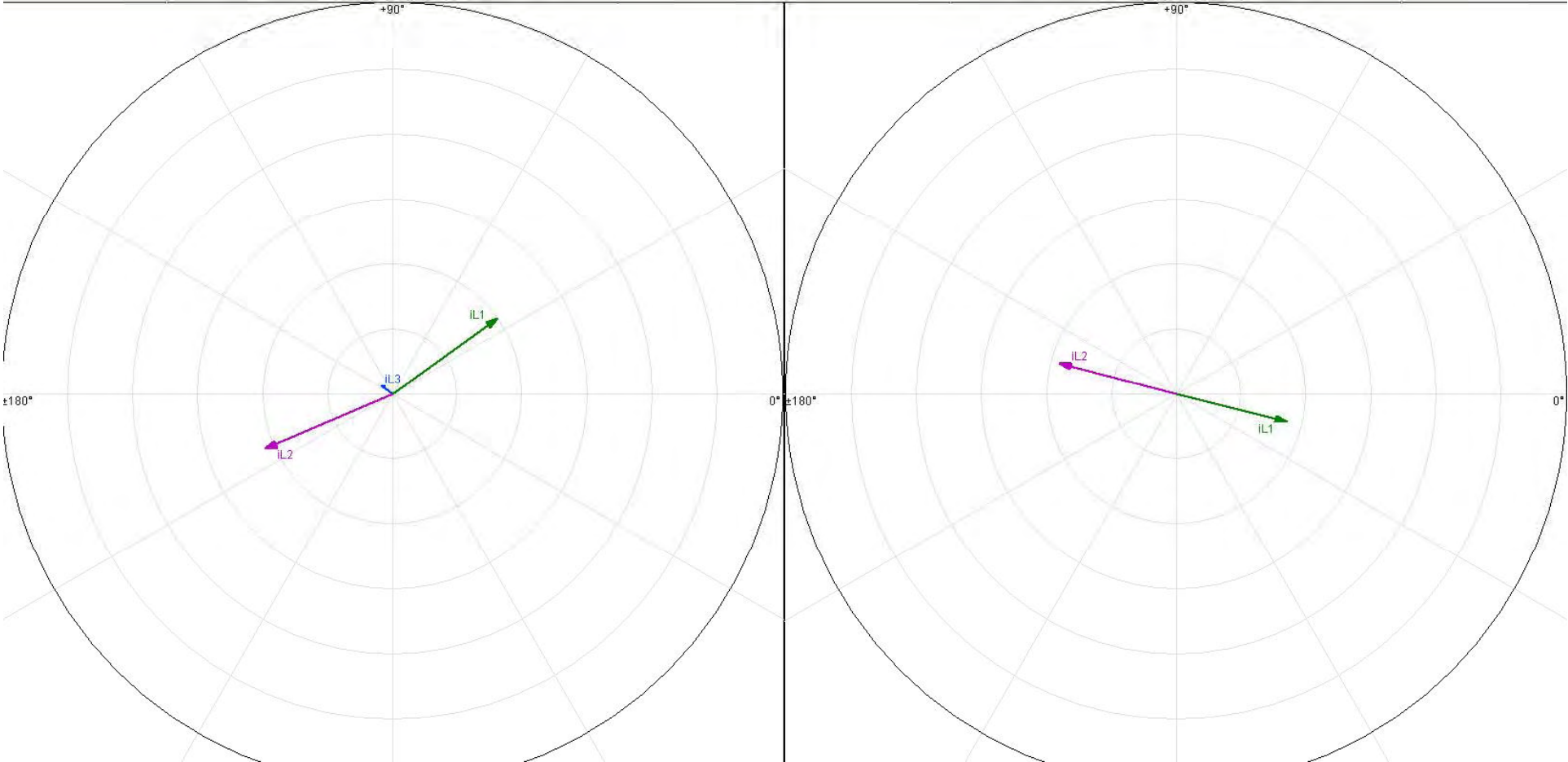


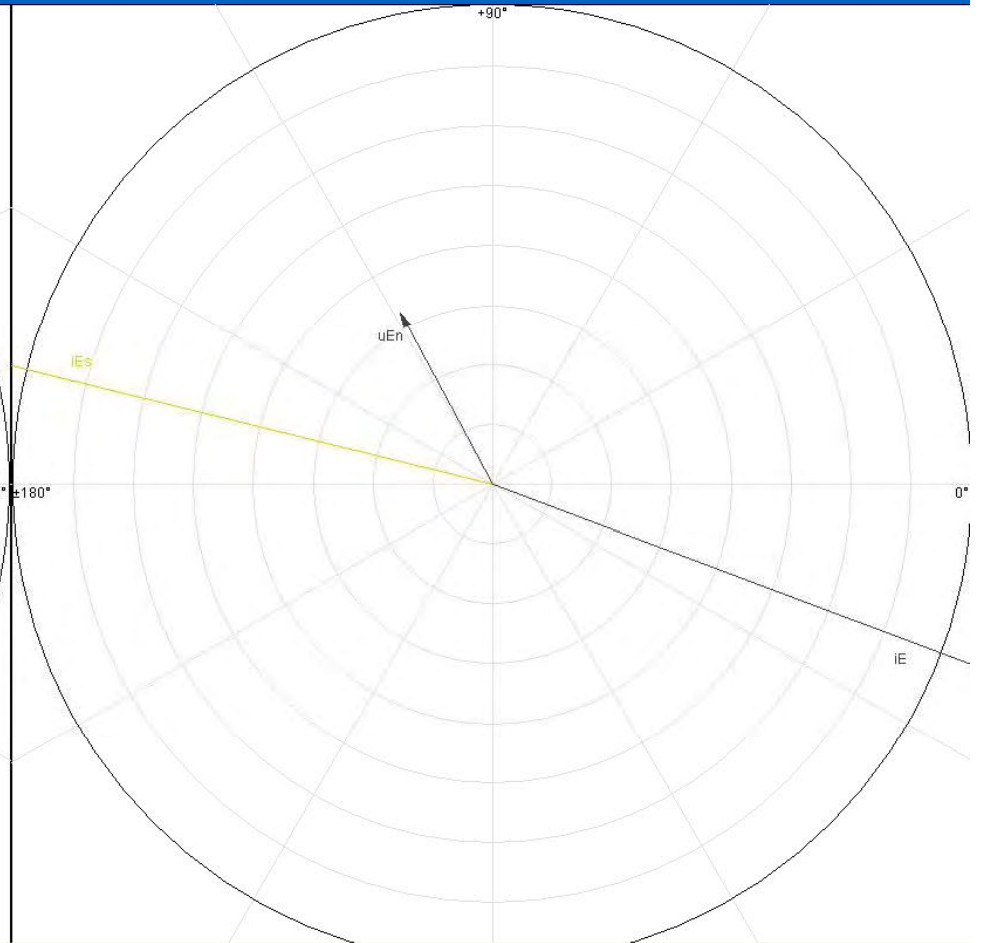
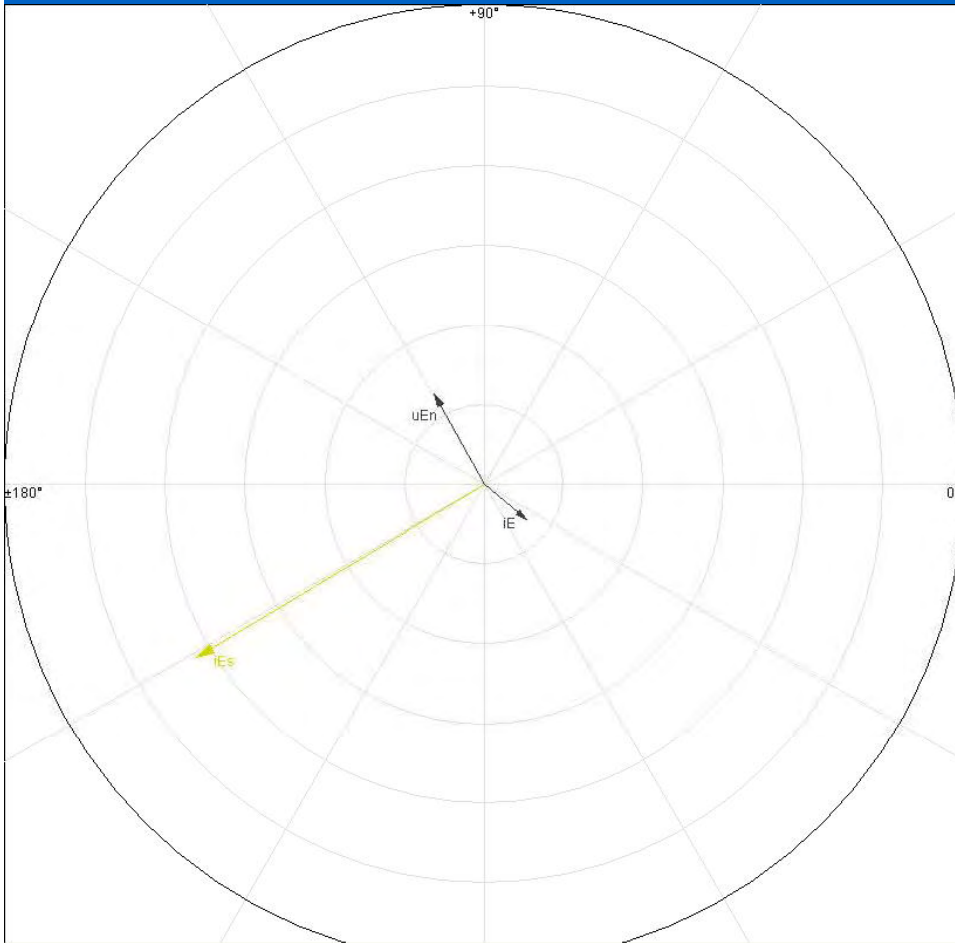
Slika 2 – Krive koje karakterišu prelazni proces pri zemljospoju preko električnog luka

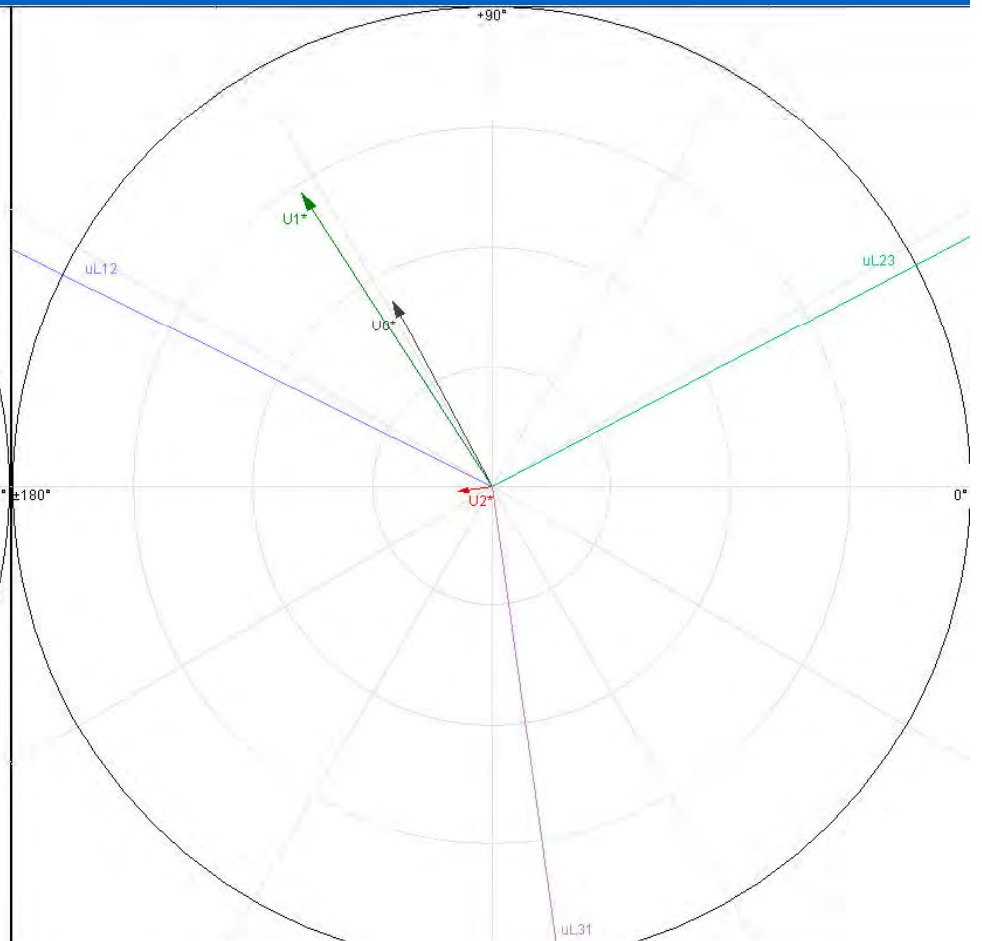
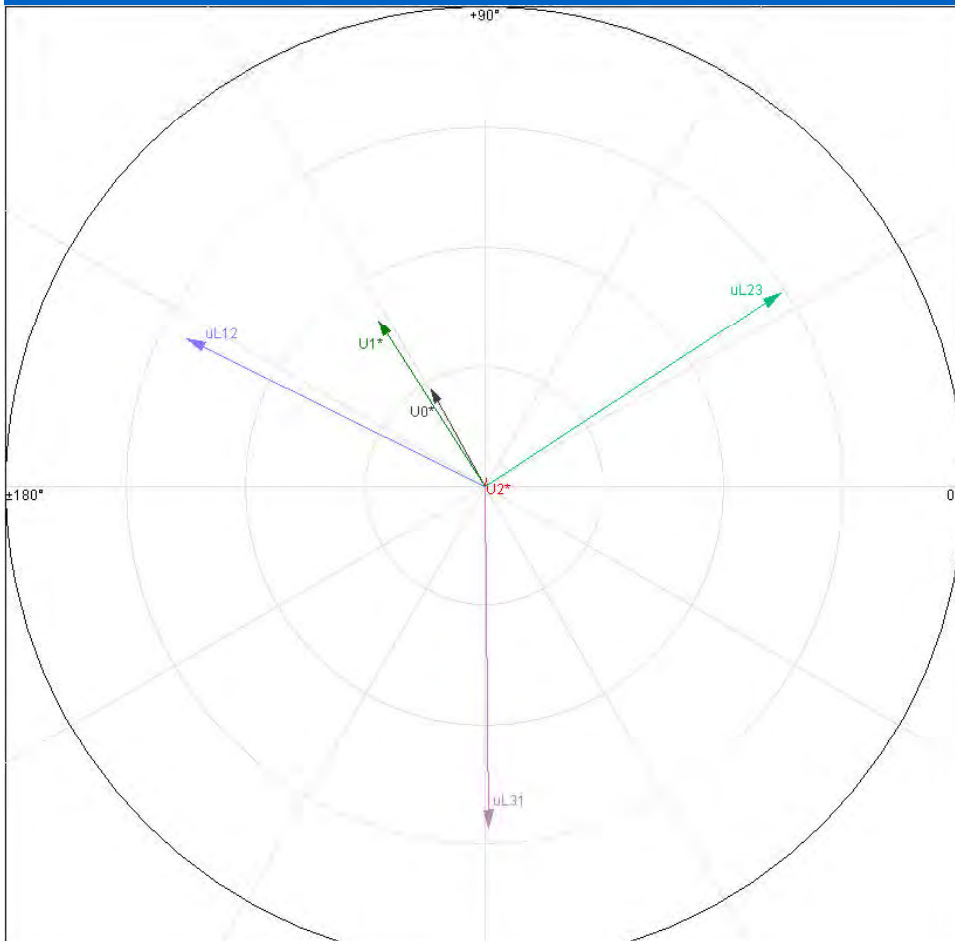
U momentu $\omega t = 3\pi/2$, fazni napon u_{fA} , ponovo dostiže maksimum, $u_A = U_m f$, tj. ponovo se uspostavlja struja preko električnog luka. U tom momentu kondenzator se puni i u vezi sa tim sledi skok struje i_Z (slika 2). Dalji proces, kao i u momentu $\omega t = \pi/2$, ponavlja se, s tim što vrednosti struja i napona menjaju znak. Pri zemljospojevima preko električnog luka, maksimalna vrednost prenapona ne može premašiti dvostruku amplitudu datog faznog napona idealne mreže.

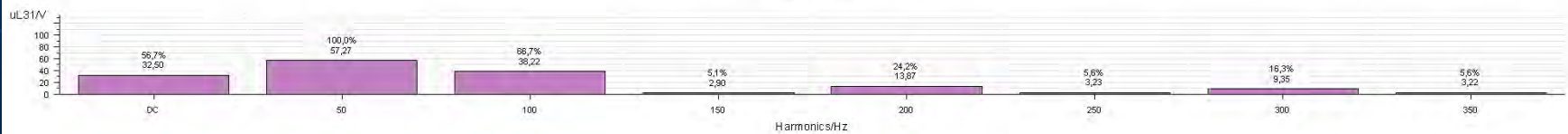
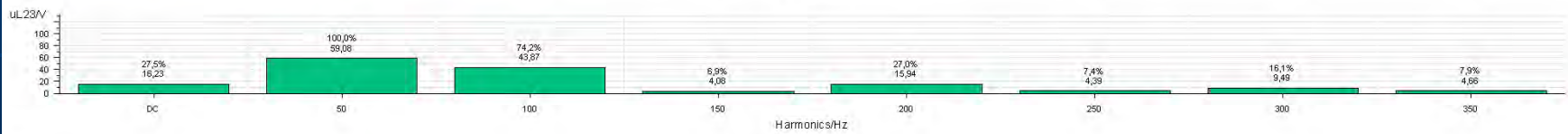
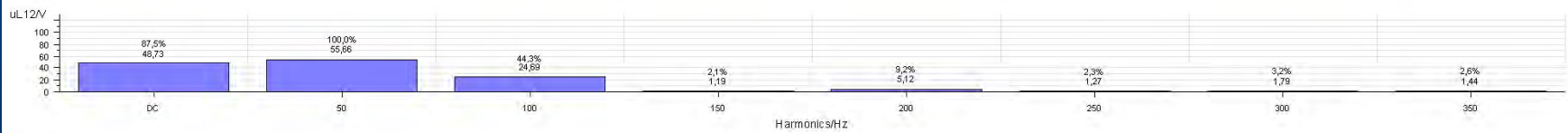
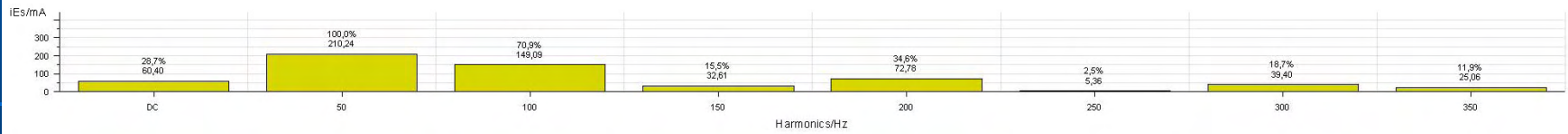
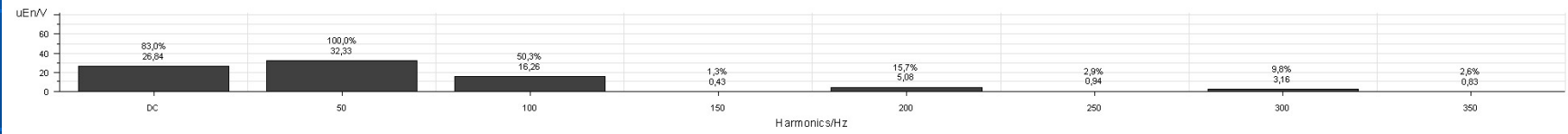
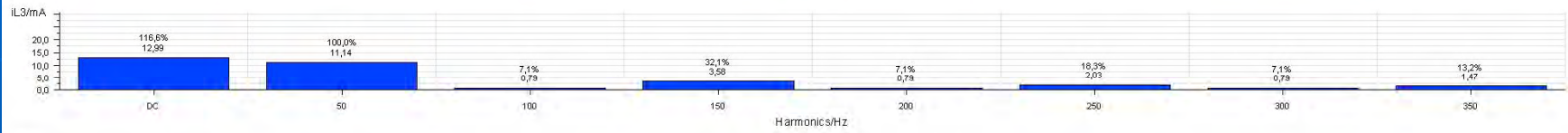
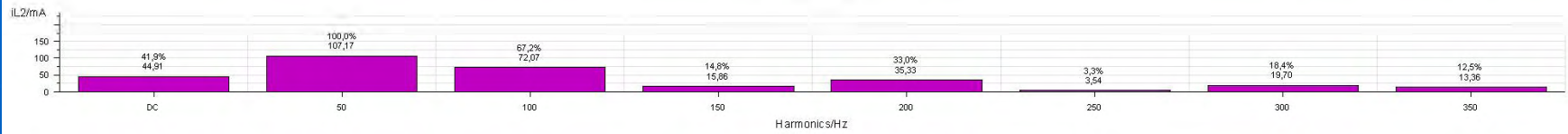
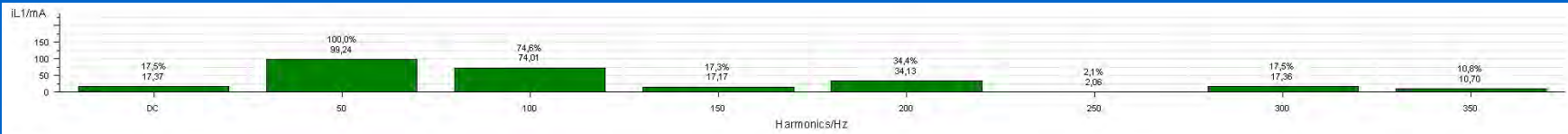
Trigger
18.6.2010
9.20:32.173











U postrojenju 6 kv, izveden je eksperiment takozvanog razvlačenja električnog luka, uz eliminisanje mogućnosti delovanja usmerene zemljospojne zaštite. Kako se vidi sa dijagrama struja zemljospoja je iznosila **$I_c = 21.8 \text{ A}$** , pa se nije moglo računati s lukom većeg obima. Uzemljenom motkom se faza **R** , galvanski spajala sa zemljom i u sledećem momentu prekidalo kolo kvara. Dolazilo je do oscilacija i formiranja nepravilnih sinusoida struja kroz fazni vod i struje u povratnoj grani. Naponski talasni oblici su za koji stepen pravilniji, mada harmonijska analiza ukazuje na drugačiju situaciju. U momentu nastanka kvara kada su struje u pitanju, dominantni su prvi harmonici (osnovni), drugi harmonik je približno 20 % vrednosti osnovnog, treći 11.5 %, četvrti 18.5 %, sedmi 11.1%, dok su ostali uglavnom zanemarljivi. Jednosmerna komponenta je 25 % osnovnog harmonika. Kada je u pitanju napon na krajevima otvorenog trougla **u_{en}** , jednosmerna komponenta je 47 % osnovnog harmonika, drugi harmonik je 46 % osnovnog, treći 23.7 %, četvrti 8.2 %, peti 9.2 %, šesti 13.1 %, sedmi 10.2 %, dok su ostali zanemarljivi.

Kod linijskih napona, dominantni su pored osnovnog, drugi, treći, i četvrti harmonik, kao i jednosmerna komponenta (izuzetak je četvrti harmonik napona **u_{31}** , što nije dovoljno jasno, ali se vidi na oscilogramu. Što se tiče kružnih dijagrama, jasno se vidi fazni pomak od **$\pi/2$** izmedju nultih komponenata napona i struje, što je i karakteristično za izolovani sistem. Dat je i fazni pomak izmedju direktne, inverzne i nulte naponske komponente uzajamno, kao i u odnosu na linijske napone. Linijski naponi su zadržali potpunu simetriju bez obzira na prisustvo kvara. Eksperiment razvlačenja električnog luka je interesantan i bilo bi veoma korisno, ponoviti ga za vrednost struje zemljospoja preko 30A, što se smatra graničnom po pitanju samogašenja i stabilnog formiranja. Javljaju se prelazni procesi, koji sami po sebi predstavljaju opasnost u odredjenim situacijama po elektroopremu, a pogotovu za kablovske glave, i oslabljena mesta na kablovima.

Interesantno bi bilo eksperiment ponoviti u 35 kV-tnoj elektro mreži, gde je struja zemljospoja po pravilu ograničena na $I = 300 \text{ A}$, i gde bi dužina električnog luka bila daleko veća. Eksperiment bi se mogao vršiti van ćelije na priključku izvedenom posebno na nekoliko metara od postrojenja da bi se izbegla opasnost od višestrukih preskoka, koji bi nastali pri jonizaciji vazduha.

Literatura:

M. Fjodorov., Zemljospojevi u mrežama 6 kV, 35 kV

Zahvaljujemo se na pažnji i
strpljenju.