



Krešimir Meštrović, Miroslav Poljak, Jandro Šimić, Damir Baronica,
Rajko Gardijan, Siniša Gazivoda, Saša Gross
KONČAR - Institut za elektrotehniku, Zagreb
Stjepan Tičinović, Marko Mandić, Ivica Marušić, Juroslav Zaninović, Ivan Krnić
HEP – PP HE Split, pogon HE “Zakučac”

33-10

MJERENJE SKLOPNIH PRENAPONA U RASKLOPNIM POSTROJENJIMA 110 I 220 kV U HE “ZAKUČAC”

SAŽETAK

U HE “Zakučac” obavljena su mjerenja i analiza primarnih i sekundarnih prijelaznih pojava pri stacionarnim radnim uvjetima i u uvjetima dinamičkih promjena stanja (sklopne operacije) u rasklopnim postrojenjima 110 i 220 kV.

Mjerenja na primarnoj visokonaponskoj strani dala su podatke o naprezanju visokonaponske opreme i služe prvenstveno za procjenu stanja opreme.

Mjerenja na sekundarnoj strani dala su informaciju o potrebnim zaštitnim mjerama na osjetljivoj elektroničkoj opremi.

Ključne riječi: Sklopni prenaponi, prekidač, rastavljač, sabirnički kratki spoj, bliski kratki spoj, elektromagnetska kompatibilnost

MEASURING OF THE SWITCHING OVERVOLTAGES IN 110 AND 220 kV SWITCHGEAR IN HP “ZAKUČAC”

SUMMARY

Measuring and analyze of primary and secondary transient phenomena have been taken during stationary and dynamical changes (switching operations) in 110 and 220 kV switchgears.

Measuring on primary high voltage side has given data for stresses on high voltage equipment and can be used for estimation of equipment condition.

Measuring on secondary side has given information about necessary protection procedures on sensitive electronic equipment.

Key words: Switching overvoltages, circuit breaker, disconnector, terminal fault, short line fault, electromagnetic compatibility

1. UVOD

Razvoj i uporaba mikroelektronike za kontrolu i zaštitu visokonaponskih elektroenergetskih postrojenja olakšava i ubrzava rad postrojenja, ali isto tako dovodi do poteškoća zbog osjetljivosti elektroničke opreme na utjecaj elektromagnetskih smetnji. Elektromagnetska okolina u visokonaponskim elektroenergetskim postrojenjima najviše ovisi o izvorima smetnji. Glavni izvori smetnji u

visokonaponskim elektroenergetskim postrojenjima su sklopni prenaponi. Sklopni prenaponi nastaju prilikom uklapanja i/ili isklapanja sklopnih aparata. Od raznih pogonskih stanja u mreži i raznih vrsta mogućih mjesta kvara, od interesa su ona koja uzrokuju najveća naponska naprezanja, a to su:

- kratki spoj u neposrednoj blizini prekidača (kratki spoj na stezaljkama),
- kratki spoj na udaljenosti nekoliko kilometara od prekidača (bliski kratki spoj),
- sklapanje malih induktivnih struja (neopterećeni trafo, prigušnice i sl.),
- sklapanje kapacitivnih struja (neopterećeni vodovi, kabeli, kondenzatorske baterije),
- sklapanje dva sistema izvan sinkronizma (opozicija faza),
- sklapanje rastavljača.

Sklopne operacije rastavljačima i prekidačima stvaraju visokofrekvencijske prijelazne pojave. Nastale smetnje se putem mjernih transformatora, metalnih plašteva kabela, uzemljivačkog sustava i zračenjem prenose do osjetljive elektroničke opreme upravljanja, signalizacije, zaštite, mjerenja i regulacije (USZMR). Konduktivnim putem i putem zračenja nastale smetnje prenose se i do osjetljive informatičke i telekomunikacijske opreme koja se instalira u visokonaponskim elektroenergetskim postrojenjima.

Za osiguravanje elektromagnetske kompatibilnosti između energetske i sekundarne opreme potrebno je opisati izvore smetnji, analizirati puteve prijenosa smetnji i poznavati otpornost uređaja i opreme koji su osjetljivi na smetnje.

2. SKLOPNI PRENAPONI

• Sklapanje rastavljača

Sklapanje rastavljača u rasklopnom postrojenju je normalno pogonsko stanje. Prilikom sklapanja, zbog male brzine kontakata dolazi između njih do uzastopnih ponovnih paljenja električnog luka. Uzastopna ponovna paljenja luka uzrokuju pojavu naponskih putnih valova vrlo strmog čela. Na mjestima diskontinuiteta dolazi do refleksije putnih valova i kao posljedica toga mogu nastati vrlo brze prenaponske pojave (VFTO, very fast transient overvoltages). VFTO su karakterizirani kratkim trajanjem i velikim frekvencijskim spektrom. Sa stajališta koordinacije izolacije ova pojava nije opasna, osim u slučaju prisustva tvorničkih grešaka, odnosno konstrukcijskih nepravilnosti. Međutim za ograničavanje prijelaznih prenapona uzrokovanih komutacijama u postrojenju, moraju se, glede uzemljenja, poduzimati dodatne mjere. U protivnom, ako uzemljenje nije korektno riješeno visokofrekventni prijelazni prenaponi, koji mogu dosegnuti amplitude od nekoliko desetaka kV, mogu uništiti sekundarnu opremu.

• Sklapanje prekidača

Jedna od osnovnih zadaća prekidača je odvajanje dijela mreže u kvaru, kao na primjer voda. Sustav zaštite aktivira prekidač. Kontakti se otvaraju i stvara se električni luk. Kod prikladnih uvjeta prekidač prekida u nultočki struje. Mreža reagira na prekidanje struje pojavom prijelaznih oscilacija tzv. *prijelaznim povratnim naponom* na stezaljkama prekidača. Ako je prijelazni povratni napon koji se pojavi na prekidaču nakon prekidanja struje previsok, prekidač ne uspijeva prekinuti struju.

Kod modernih visokonaponskih prekidača razlikujemo dva tipa kvarova različitih svojstava. Ako je odmah nakon nultočke struje strmina prijelaznog povratnog napona du/dt (tzv. *početni dio prijelaznog povratnog napona*) veća od neke kritične vrijednosti, kanal luka koji je gotovo nestao ponovo se uspostavlja Jouleovim gubicima. Ovaj period kontroliran energetsom ravnotežom naziva se *režim termičkog proboja*.

Nakon uspješnog termičkog prekidanja prijelazni povratni napon može doseći takvu tjemenu vrijednost U_c da nastupi proboj između kontakata prekidača. Ta pojava naziva se *dielektrički proboj* između kontakata prekidača.

Postojanje ova dva osnovna režima kvara, svakog sa svojim svojstvima, ima važne posljedice na područje primjene prekidača. Od raznih vrsta mogućih mjesta kvarova i stanja u mreži, od interesa su samo oni kvarovi koji uzrokuju najveća naprezanja s obzirom na strminu prijelaznog povratnog napona (du/dt) i visinu povratnog napona (U_c), te na veličinu struje kratkog spoja (I).

Iskustvo pokazuje da je za veličinu tjemene vrijednosti povratnog napona, tj. za režim dielektričkog proboja, kritičan *kvar na stezaljkama prekidača*. Za režim termičkog proboja kritičan je kvar koji se javlja na vodu na nekoj udaljenosti od prekidača. Najveća naprezanja javljaju se u slučaju relativno kratkih vodova dužine nekoliko kilometara. Stoga se ovaj kvar naziva *kilometrički kvar* ili češće *bliski kratki spoj*.

Ovdje treba naglasiti da postoje još i neki specijalni slučajevi sklapanja pogonskih struja, pri kojima se javljaju naponska naprezanja daleko teža nego kod prekidanja struje kratkog spoja, pa se može desiti da prekidač ne uspije prekinuti struju unatoč tome što je njen iznos desetak pa i stotinjak puta niži od njegove nazivne prekidne moći. U te specijalne slučajeve spadaju *opozicija faza*, *isklapanje neopterećenih transformatora*, *sklapanje dugih vodova* i *sklapanje kondenzatorskih baterija*.

2.1. PROGRAM MJERENJE SKLOPNIH PRENAPONA U RP110 kV

U okviru mjerenja tranzijentnih prenapona u dinamičkim stanjima u RP 110 kV obavljena su mjerenja prema ispitnim konfiguracijama koje uključuju:

- Sklapanje sabirničkog rastavljača u mjernom polju
- Sklapanje sabirničkih rastavljača u spojnom polju
- Sklapanje linijskog rastavljača u dalekovodnom polju
- Isklapanje neopterećenog dalekovoda prekidačem
- Sklapanje prekidača u polju mrežnog transformatora
- Sklapanje prekidača u generatorskom polju
- Prekidanje struje jednopolnog kratkog spoja u neposrednoj blizini 110 kV prekidača
- Prekidanje struje jednopolnog bliskog kratkog spoja prekidačem 110 kV

2.2. PROGRAM MJERENJE SKLOPNIH PRENAPONA U RP220 kV

U okviru mjerenja tranzijentnih prenapona u dinamičkim stanjima u RP 220 kV obavljena su mjerenja prema ispitnim konfiguracijama koje uključuju:

- Sklapanje sabirničkog rastavljača u mjernom polju
- Sklapanje rastavljača u dalekovodnom polju
- Isklapanje neopterećenog dalekovoda prekidačem
- Sklapanje prekidača u polju mrežnog transformatora
- Prekidanje struje jednopolnog kratkog spoja u neposrednoj blizini 220 kV prekidača
- Prekidanje struje jednopolnog bliskog kratkog spoja prekidačem 220 kV

Smetnje nastale u primarnim krugovima postrojenja se putem mjernih transformatora, metalnih plašteva kabela, uzemljivačkog sustava prenose do osjetljive elektroničke opreme USZMR-a. Tijekom ispitivanja primarnih i sekundarnih prenapona potrebno je obaviti i mjerenja na drugim mjestima kako bi se uočilo i širenje smetnji prema osjetljivoj opremi. Uslijed visokog spektra frekvencija utjecaj na sekundarnu opremu se osim galvanskih, kapacitivnih i induktivnih sprega odvija i zračenim putem. Zbog toga su u okviru dinamičkih mjerenja provedena i slijedeća mjerenja :

- magnetskih i elektromagnetskih polja
- konduktivnih smetnji i prenapona
- uzdužnog i poprečnog napona na signalnim krugovima

Pri sklopnim manipulacijama provedena su mjerenja i na sekundarnim vodovima mjernih transformatora na kojima nastaju relativno najveći prenaponi. Mjerenja su izvođena na priključnim letvicama sekundarnih vodova mjernih transformatora, odnosno na vodovima koji od priključnih letvica odlaze u upravljačnicu komandne zgrade, te prema opremi USZMR-a smještenoj u kontejneru u RP 110 kV. Ova mjerenja nadopunjena su mjerenjima napona i struja između odspojenih plašteva kabela i uzemljivačkih traka kako u postrojenju tako i na drugim pozicijama u elektrani i pri različitim manipulacijama. Osim toga provedena su također i mjerenja magnetskih polja koja se javljaju pri sklopnim operacijama i kratkim spojevima u RP 110/220 kV.

3. MJERNA OPREMA ZA MJERENJE SKLOPNIH PRENAPONA NA VN I NN STRANI

Mjerenje prenapona u visokonaponskom postrojenju prilikom sklopnih manipulacija spada u grupu vrlo složenih mjerenja. Sklapanja rastavljača su pojave koja traju u sekundama, a pojave uzrokovane paljenjem i gašenjem luka su po svom karakteru brze (nanosekundno područje). Djelitelji koji se fizički nalaze vrlo blizu otvorenog luka moraju biti "otporni" na smetnje, odnosno sustav prijenosa mjernog signala mora se koncipirati tako da se navedene smetnje reduciraju na najmanju moguću mjeru.

Za mjerenje sklopnih prenapona u rasklopnom postrojenju HE "Zakučac" visokonaponski djelitelji su koncipirani za dva naponska nivoa. Budući da se radilo o mjerenju u realnom postrojenju sa specifičnim rasporedom sabirničkih sustava i ograničenim prostorom za lociranje dijelila u postrojenju i malim razmakom prema ostalim dijelovima pod naponom, osnovni uvjet koji je trebalo ispuniti je zaštita od slučajne pojave previsokog napona na niskonaponskoj strani dijelila, odnosno na mjernim uređajima.

3.1. Visokonaponski djelitelji napona

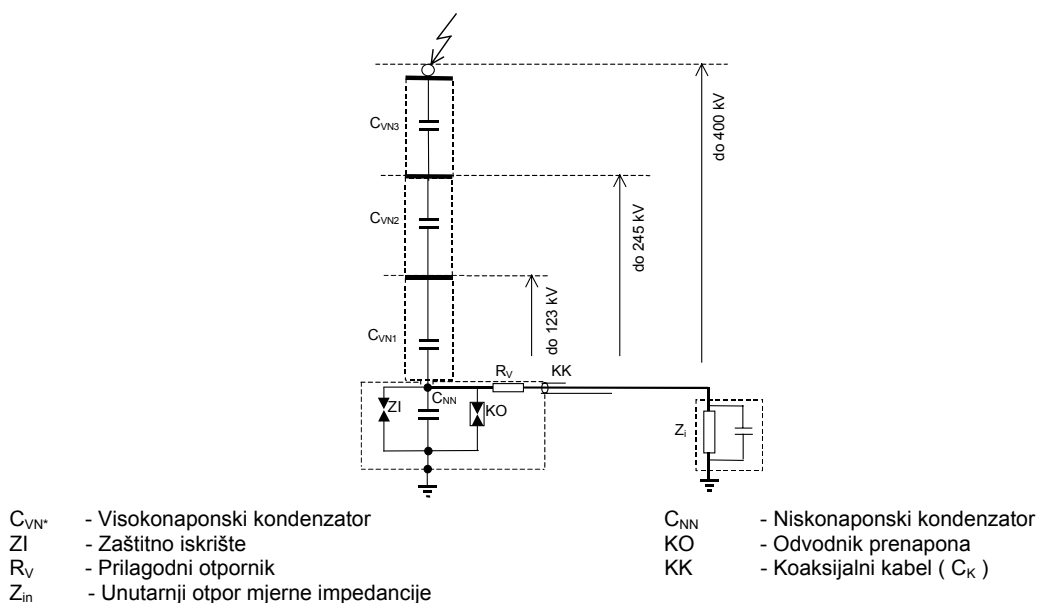
Visokonaponski djelitelji napona koncipirani su kao modularni djelitelji napona sa mogućnošću proširenja područja primjene od $U_n = 123$ kV do $U_n = 400$ kV na način da se dodaje visokonaponski kondenzator u seriju na osnovni djelitelj napona, slika 1. U svim varijantama napon na niskonaponskoj strani za stacionarno stanje mreže ostaje isti.

Budući da su se visokonaponska dijelila konstruirala specijalno za mjerenja u rasklopnom postrojenju HE Zakučac (110 i 220 kV), izrađeno je ukupno 6 dijelila za mjerenje u 110 kV postrojenju, odnosno 3 djelitelja za mjerenje u 220 kV postrojenju. Visokonaponski kondenzator smješten je u porculanskom kućištu i predviđen je za vanjsku montažu.

Vrijednosti kapaciteta pojedinih kondenzatora dani su u tablici 1. Vrijednosti iz tablice mjerene su pri 140 kV. Ispitivanjem je određena rezonantna frekvencija visokonaponskih djelitelja i nalazi se iznad 10 MHz.

Tablica 1

Ser. br.	752	753	754	755	756	757
U_n (kV)	123	123	123	123	123	123
C (pF)	193.2	194.3	193.4	193.2	196.3	192.4
tg δ %	0.056	0.059	0.054	0.058	0.052	0.057



Slika 1 Principijelna shema visokonaponskog djelitelja napona

Niskonaponski dio kapacitivnog djelitelja, kao što se vidi na slici 1, sastoji se od grupe niskonaponskih kondenzatora, odvodnika prenapona kao prvog stupnja zaštite, zaštitnog iskrišta kao drugog stupnja zaštite. Na izlazu iz niskonaponskog djela kapacitivnog dijelila a prije priključka za koaksijalni kabel nalazi se prilagodni omski otpor, koji po svom iznosu odgovara valnom otporu koaksijalnog kabla. Iznos niskonaponskog kapaciteta je ≈ 600 nF.

Prijenosni omjer kapacitivnog djelitelja napona računa se preko izraza:

$$p = \frac{C_{NN} + C_{VN} + C_K}{C_{Vn}} = \frac{C_{NN} + C_K}{C_{Vn}} + 1$$

Prijenosni omjeri djelitelja napona za 123 kV dani su u tablici 2.

Tablica 2

Djelitelj br.	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Prijenosni omjer	3167	3164	3182	3171	3132	3184

Prijenosni omjeri djelitelja napona za 245 kV dani su u tablici 3.

Tablica 3

Djelitelj br.	D1	D2	D3
Prijenosni omjer	6347	6287	6353

Gornji prijenosni omjeri određeni su za mjerni kabel od 100 m.

Mjerni priključak na niskonaponskom djelu kapacitivnog djelitelja je tipa BNC, valnog otpora $Z_v=75 \Omega$. Za prijenos mjernog signala od djelitelja napona do mjernih uređaja za mjerenje i registraciju korišteni su koaksijalni kablovi također valne impedancije $Z_v=75 \Omega$ ($C_0=60$ pF/m). Zbog konfiguracije rasklopnog postrojenja i zahtjeva zaštite na radu u visokonaponskim postrojenjima, korišteni su kabeli različitih dužina od 10 do 200 metara, ovisno o mjestu mjerenja. U lokalnim ormarima polja mjereno je direktno sa visokonaponskim sondama.

3.2. Uređaji za mjerenje i registraciju

Za mjerenje i registraciju na niskonaponskoj strani visokonaponske mjerne opreme korišteni su slijedeći mjerni uređaji:

- digitalni osciloskopi Tektronix, tip TDS 540 i TDS 754 D
- tranzient rekorder BBC – GOERZ METRAWAT, tip SE 560

Osciloskop TDS 540 - digitalni, četverokanalni, 500 MHz, 1GS/s, 50 K, vertikalna točnost 1%, 8 bita

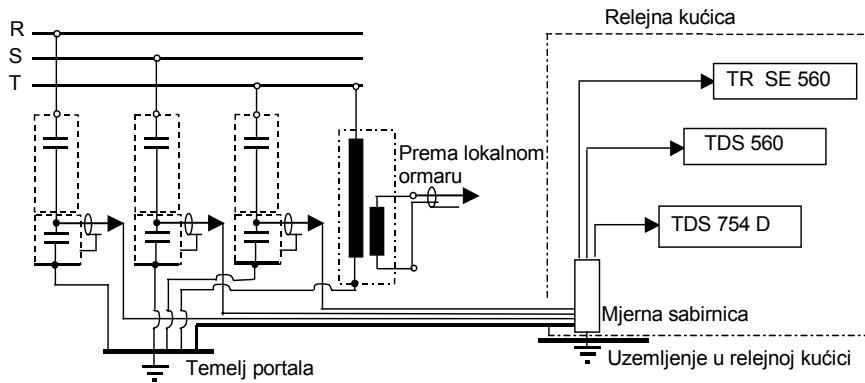
Osciloskop TDS 754 D - digitalni, četverokanalni, 500 MHz, 2GS/s, 130 K, vertikalna točnost 1%, 8 bita

Tranzient rekorder SE 560 - digitalni, 11 kanalni, 250 kHz, 1MS/s, 16 K, vertikalna točnost 1%, 8 bita

Svi mjerni uređaji imali su mjerni ulaz (unutarnja mjerna impedancija) $1M\Omega/20$ pF. Mjerni uređaji za registraciju priključivani su na mrežu preko transformatora za potiskivanje smetnji.

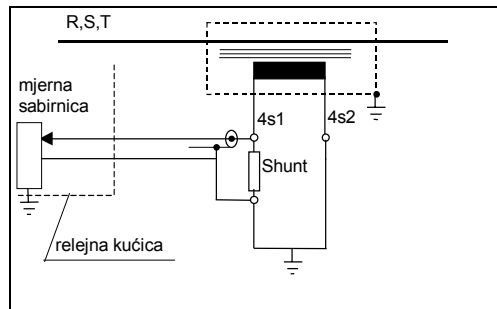
3.3. Uzemljenja

Visokonaponska dijelila uzemljena se u na način prikazan na slici 2. tj. kućište kapacitivnih dijelila zajedno sa oklopom koaksijalnog kabla uzemljena su zajedno u jednoj točki u ispitivanom polju, najčešće na najbliži portal. Mjerni kablovi su najkraćom vezom grupirani u snop zajedno sa dodatnim vodičem za uzemljenje i povučeni do relejne kućice. Dodatno uzemljenje je izolirano od ostalih metalnih dijelova u postrojenju da bi se spriječila iskrenja tokom tranzijentnih stanja.



Slika 2 Principijelni način uzemljenja ispitne i mjerne opreme u VN postrojenju

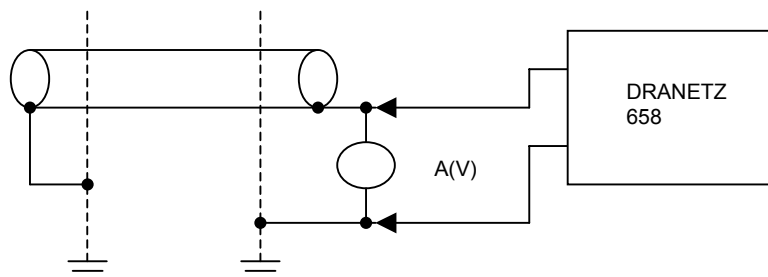
Sekundarni krugovi mjernih transformatora u postrojenju uzemljeni su u ormarima polja. Kod mjerenja kapacitivno prenešenih napona na sekundarne krugove mjernih transformatora korišteno je uzemljenje ormara polja. Kod mjerenja struje kratkog spoja, sekundarni krug strujnog transformatora (sa shuntom u krugu) uzemljen je prema slici 3.



Slika 3 Shema spajanja shunta u sekundarni krug strujnog transformatora

3.4. Mjerni sustav za mjerenja na sekundarnim krugovima

Za vrijeme mjerenja tranzijentnih prenapona uzrokovanih sklopnim manipulacijama obavljena su mjerenja na sekundarnim krugovima. Obavljena su mjerenja linijskih i faznih napona na voltmetrima, te struja na ampermetrima u upravljačnici, strojarnici, zatim na priključnim stezaljkama u ormarima opreme USZMR-a u kontejner kućici RP 110 kV, te u mjernim poljima RP 35 kV. Također, obavljena su mjerenja napona i struja između odspojenih plašteva kabela i uzemljivačkih traka na raznim pozicijama u elektrani. Mjerenja su obavljena analizatorom DRANETZ 658.



Slika 4 Principijelna shema mjerenja struje kroz plašteve kabela i napona između odspojenih plašteva kabela i uzemljenja

4. PRIMJERI REZULTATA MJERENJA SKLOPNIH PRENAPONA

Mjerenje sklopnih prenapona provedeno je u skladu s programom mjerenja opisanom u točki 2. Naponi na primarnoj visokonaponskoj strani oscilografirani su pomoću kapacitivnog djelitelja, tranzient rekordera i digitalnog osciloskopa. Naponi u sekundarnim krugovima oscilografirani su digitalnim osciloskopom u ormaru polja.

4.1. Prekidanje struje jednopolnog bliskog KS prekidačem 110 kV

Jednopolni kratki spoj iniciran je u fazi R na 7 stupu dalekovoda DV Meterize 3. Udaljenost mjesta kratkog spoja od elektrane iznosila je 1841 m.

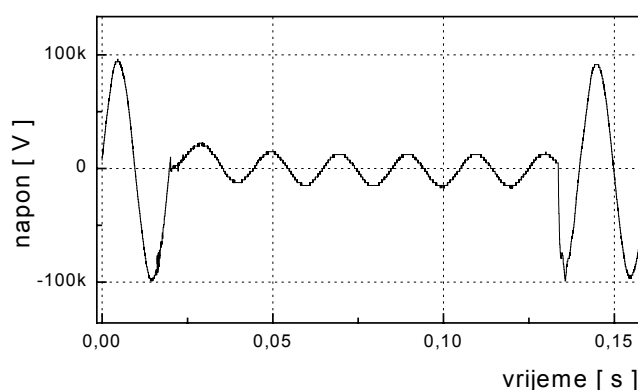
Uspješno je registrirano tri isklopa prekidača u sve tri faze sistema, tako da je za analizu dostupno pet pojava isklopa.

Sažetak rezultata prikazan je u Tablici 4, a tipični oscilogrami na slikama 4. i 5.

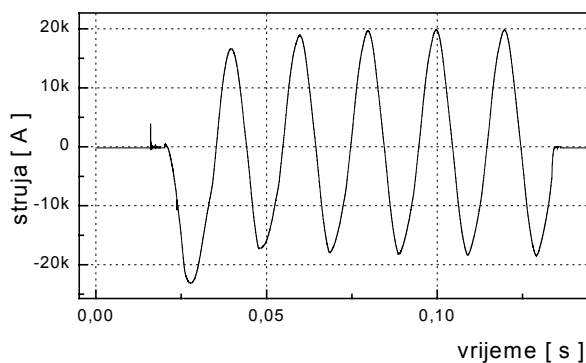
Tablica 4

Manipulacija	Najniža vrijednost / kV	Najviša vrijednost / kV	Srednja vrijednost / kV
Isklop	93.99	103.88	97.94

Vršna vrijednost struje jednopolnog KS iznosila je 20.7 kA, 20.89 kA i 23.04 kA.



Slika 4 Isključivanje prekidača u dalekovodnom polju (napon)



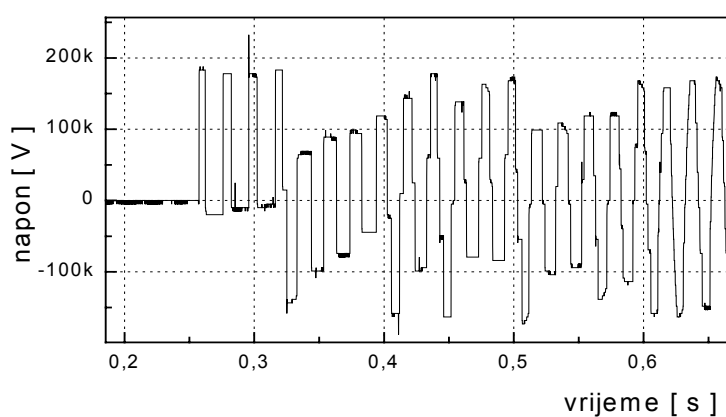
Slika 5 Isključivanje prekidača u dalekovodnom polju (struja)

4.2. Sklapanje sabirničkog rastavljača 220 kV u mjernom polju

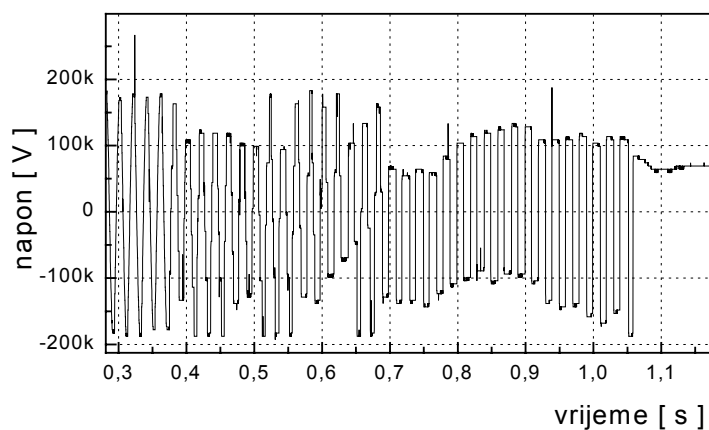
Mjerenje sklopnih prenapona izvršeno je prilikom sklapanja sabirničkog rastavljača u mjernom polju D1 sistema II sabirnica. Uspješno je registrirano šest uklopa i sedam isklopa rastavljača u sve tri faze sistema, tako da je za analizu dostupno osamnaest pojava uklopa i dvadesetjedna pojava isklopa rastavljača. Sažetak rezultata prikazan je u Tablici 4, a tipični oscilogrami na slikama 6 i 7.

Tablica 4

Manipulacija	Najniža vrijednost / kV	Najviša vrijednost / kV	Srednja vrijednost / kV
Uklop	182.97	232.43	200.83
Isklop	182.97	267.04	208.17



Slika 6 Uklop sabirničkog rastavljača 220 kV u mjernom polju



Slika 7 Isklop sabirničkog rastavljača 220 kV u mjernom polju

4.3. Prekidanje struje jednopolnog KS na stezaljkama 220 kV prekidača

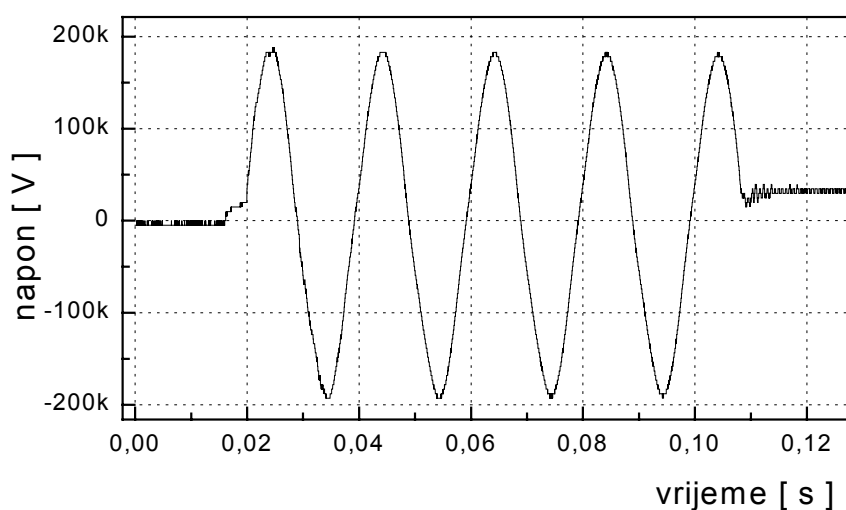
Jednopolni kratki spoj iniciran je pomoću dva bakrena užeta 90 mm² neposredno iza izlaznog rastavljača u fazi R u dalekovodnom polju D7 (DV Mostar) sistema II sabirnica.

Uspješno su registrirana dva isklopa prekidača u sve tri faze sistema, tako da je za analizu dostupno dvije pojave isklopa. Sažetak rezultata prikazan je u Tablici 5, a tipični oscilogrami na slikama 8 i 9.

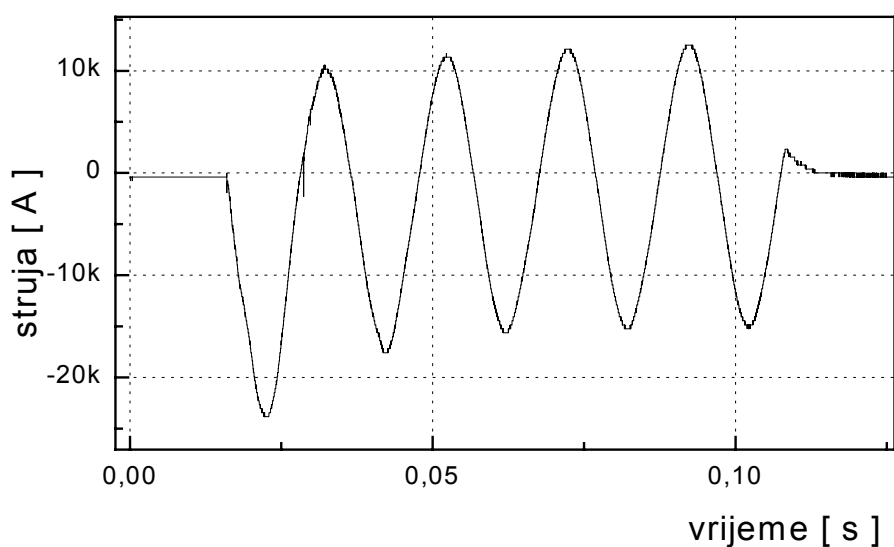
Tablica 5

Manipulacija	Najniža vrijednost / kV	Najviša vrijednost / kV	Srednja vrijednost / kV
Isklop	187.92	192.86	190.39

Vršna vrijednost struja jednopolnog KS iznosila je 23.24 kA i 23.82 kA.



Slika 8 Isklop prekidača u dalekovodnom polju (napon)



Slika 9 Isklop prekidača u dalekovodnom polju (struja)

5. ZAKLJUČAK

Različite sklopne operacije uzrokuju i različite iznose sklopnih prenapona koji ujedno i naprežu izolacijski sustav visokonaponskih aparata. Naravno, ovisno o izvoru i uzroku nastanka ti prenaponi imaju i različito trajanje koje se kreće u rasponu od nekoliko desetinki μs do nekoliko ms dok njihove teoretske maksimalne amplitude iznose do 4,5 p.u.

U skladu s koordinacijom izolacije elektroenergetska oprema instalirana u VN postrojenjima ispituje se atmosferskim i sklopnim naponima naponima čije amplitude su dovoljno velikog iznosa da predstavljaju osnovni element pouzdanosti instalirane opreme. Uobičajeno je da se važni elementi postrojenja (npr. energetske transformatori) dodatno štite odvodnicima prenapona. Minimalne proradne vrijednosti odvodnika u iznose približno 230 kV u mrežama najvišeg napona opreme 123 kV odnosno 400 kV za 245 kV mrežu, a stvarni iznosi ovise o tipu i vrsti odvodnika kao i o strmini i tipu prenapona.

Na temelju analize rezultata mjerenja različitih sklopnih operacija u RP 110 kV i RP 220 kV može se zaključiti da iznosi prenapona nisu previsoki, a veće amplitude prenapona su pri sklapanju rastavljača. Relativno gledano u odnosu na nazivni napon mreže veća naprezanja su u mreži 110 kV.

Kvantitativna analiza rezultata mjerenja pokazuje da su prenaponi u rasklopnom postrojenju u okviru očekivanih vrijednosti, pa izolacijski sustavi VN opreme nisu dodatno napregnuti, a s tim u vezi ne očekuje se smanjenje životne dobi VN aparata u rasklopnom postrojenju HE "Zakućac".



Slika 10 Isklop rastavljača u mjernom polju 220 kV