

dr. sc. Sonja Ravlić Begić, mag. ing. el.
Ravel d.o.o.
sonja.ravlic@ravel.hr

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.
Ravel d.o.o.
velimir.ravlic@ravel.hr

PRIMJENA REGULACIJSKE PRIGUŠNICE S CILJEM POBOLJŠANJA NAPONSKIH PRILIKA U TS MELINA

SAŽETAK

Slabo opterećenje prijenosne mreže elektroenergetskog sustava Hrvatske te susjednih država dovelo je do problema previsokih napona koji se nastoji riješiti ugradnjom kompenzacijskih uređaja u Hrvatskoj i Sloveniji. Dosadašnjim istraživanjima definirane su lokacija, snaga i vrsta kompenzacijskih uređaja te je zaključeno da se, između ostalih čvorišta prijenosne mreže, u TS Melina ugradi regulacijska prigušnica nazivne snage 200 MVar i opsega regulacije 30 % do 100 % nazivne snage.

Prilikom izrade projekta analizirana je problematika elektromagnetske kompatibilnosti u TS Melina nakon priključenja novog polja s regulacijskom prigušnicom nazivne snage 200 MVar.

Jedan od problema uklapanja visokonaponskih prigušnica u 220 kV postrojenje u TS Melina predstavljaju sklopne operacije. Visokonaponska prigušnica je uređaj koji se relativno često sklapa, tj. uključuje kod slabijeg opterećenja, da bi kod porasta opterećenja iskllopila odnosno promijenila položaj regulacijske sklopke. Kod isklapanja prigušnica pojavljuju se nesimetrične struje visokih vrijednosti s dugom vremenskom konstantom, a isklapanje je praćeno pojavom strmih prenapona.

Ključne riječi: regulacijska prigušnica, kompenzacijski uređaji, sklopne operacije, vrlo strmi prenaponi

INSTALLATION OF VARIABLE SHUNT REACTOR FOR IMPROVING VOLTAGE CONDITION IN SS MELINA

ABSTRACT

Weak loads on the transmission system in Croatia and neighbour countries lead to problems regarding high voltages. This problem will be solved by using compensation devices in Croatia and Slovenia. Conducted research defined location, rated power and type of compensation device. One of them is the installation of Variable Shunt Reactor in SS MELINA. Rated power of the Variable Shunt Reactor is 200 MVar and regulation range from 30 % to 100 % rated power.

During the design phase problems regarding electromagnetic compatibility in SS MELINA after installation of the new bay with Variable Shunt Reactor, 200 MVar, were analysed as well.

One of the main problems regarding installation of Variable Shunt Reactor in SS MELINA is switching operations. The Variable Shunt Reactor has a large number of switching operations. During switching operations, asymmetrical currents with high values and long time constant can appear. Very fast overvoltages appear as well.

Key words: variable shunt reactor, compensation device, switching operations, very fast overvoltages

1. UVOD

Problem regulacije napona, odnosno jalovih snaga u prijenosnoj 400 kV, 220 kV i 110 kV mreži prisutan je već dulji niz godina, posebice u stanjima niskog opterećenja. Predmetna problematika još je dodatno usložnjena uvođenjem tržišnih uvjeta i donošenjem odgovarajućih zakonskih i podzakonskih akata koji uređuju tehničke, regulatorne i ekonomske normative rada prijenosne mreže.

Navedena problematika može se razdvojiti na onu koja se odnosi na „sjeverni dio“ prijenosne mreže (TS Ernestinovo – TS Žerjavinec – TS Tumbri – TS Melina) te na „južni dio“ prijenosne mreže (TS Melina – RHE Velebit – TS Konjsko – TS Mostar). Regulacija napona na razini 400 kV mreže za „sjeverni dio“ djelomično je riješena prigušnicom u TS 400/110 kV Ernestinovo te radom NE Krško u kapacitivnom području.

U „južnom dijelu“ prijenosne mreže samo rad dalmatinskih elektrana u kapacitivnom području (pri čemu značajniji doprinos ima samo RHE Velebit) omogućava djelomično rješenje naponskih prilika. Izgradnjom i puštanjem u pogon DV 2x400 kV Ernestinovo – Pecs uočen je porast napona u predmetnim čvorištima TS Ernestinovo, TS Žerjavinec, TS Tumbri i TS Mraclin pogotovo u situacijama niskog opterećenja. Također, obzirom na specifičnost oblika teritorija, značajan je i međusobni utjecaj susjednih sustava na naponske prilike na istočnom kraku (TE Obrenovac i TE Ugljevik). Zbog svega navedenog i s obzirom na trenutno stanje proizvodnih objekata i visokonaponske mreže na području Rijeke može se zaključiti da bez ugradnje novog kompenzacijskog uređaja u TS 400/220/110 MELINA nije bilo moguće u cijelosti riješiti problem visokih napona, a što su pokazale i sve do sada izrađene studije.

1.2 Osnovni ciljevi i opseg izgradnje

U 220 kV postrojenju u TS 400/220/110 MELINA ugrađena je prigušnice nazivne snage 200 MVar i opremljeno je 220 kV polja =D14.

Novo polje prigušnice 220 kV je u poluvisokoj izvedbi, odnosno donji uzemljeni dijelovi aparata su najmanje 2500 mm iznad tla. Izolacijski nivo postrojenja je 245 Si 460/1050. Izolacija je za III. stupanj zagađenja (25 kV/mm). Samo sabirnički rastavljači imaju zbog smanjenih razmaka u postojećem 220 kV postrojenju sniženi stupanj izolacije 245 SI395/950 [1, 2].

Projekt je obuhvatio sljedeće zahvate:

- Ugradnju nove prigušnice nazivne snage 200 MVar kod napona 242 kV.
- Izgradnju uljne kade te zauljene kanalizacije za novu prigušnicu.
- Opremanje postojećeg 220 kV polja primarnom i sekundarnom opremom:
 - ugradnju prekidača,
 - ugradnju sabirničkih rastavljača,
 - ugradnju mjernih transformatora,
 - ugradnju odvodnika prenapona s pripadnim uzemljivačkim sondama i povezivanje s postojećim uzemljivačem TS MELINA,
 - ugradnju potpornih izolatora,
 - izvedbu primarnih spojeva,
 - ugradnju ormarića naponskih grana,
 - ugradnju ormara sekundarne opreme polja prigušnice (jedan ormar sekundarne opreme za nadzor i upravljanje, a drugi ormar sekundarne opreme za zaštitu u relejnoj kućici RK 5),
 - ugradnju opreme mjerenja u postojeći ormar mjerenja +QM7,
 - ugradnju opreme za kontrolu kvalitete električne energije u postojeći ormar mjerenja +QM7,
 - uklanjanje prigušnice i novog polja prigušnice u postojeći sustav nadzora i upravljanja.
- Izgradnju temelja i postolja aparata.
- Ugradnju kableske kanalizacije u polju.
- Dogradnju novog uzemljivača.
- Uređenje dijela platoa u predmetnom polju.
- Opskrbu novih trošila istosmjernim naponom 220 V DC i izmjeničnim naponom 0,4 kV, 50 Hz.



Sl. 1.: Radovi na izgradnji temelja polja =D14 u 220 kV postrojenju



Sl. 2.: Prostorni prikaz TS 400/220/110 kV MELINA i polja =D14

1.3 Tehničke karakteristike prigušnice ugrađene u TS 400/220/110 kV MELINA

U TS 400/220/110 kV MELINA ugrađena je trofazna uljna regulirana prigušnica za vanjsku montažu sa zatvorenim sustavom disanja. Prigušnica je predviđena za trajni pogon. Nazivna snaga prigušnice je 200 MVA_r kod 242 kV uz regulaciju 30 % do 100 % , a nazivni napon visokonaponske strane 245 kV. Nazivna frekvencija je 50 Hz, a grupa spoja YN. Regulacijska prigušnica zadovoljava normu [3] i smjernice radne grupe CIGRÉ [4].

Način hlađenja je ONAN. Regulacija napona vrši se pod teretom. Neutralna točka VN namota direktno je uzemljena.

Spojevi prigušnice u polju =D14 projektirani su tako da mogu izdržati dinamička i termička naprezanja u kratkom spoju u skladu s IEC normama.

Izolacija namota je stupnjevana dok je izolacija namota neutralne točke jednolika.

Stupanj izolacije namota i priključka je sljedeći:

- Stupanj izolacije faznih namota je u skladu s IEC 60076-3 (LI950/AC395).
- Stupanj izolacije namota neutralne točke je u skladu s IEC 60076-3(LI325/AC140).
- Uvjeti okoline su u skladu s IEC 60076-1 i IEC 60076-2.

Priključci

- VN strana: silikonski provodnici ulje-zrak za vanjsku montažu.
- Neutralna točka VN: silikonski provodnici ulje-zrak za vanjsku montažu.

Zagrijavanje

- Zagrijavanje su usklađena s IEC 60076-1,2:
- Zagrijanje namota: 65 K
- Zagrijanje ulja: 60 K

Prigušnica je opremljena sljedećom opremom:

- Buchholz relej,
- odušnici;
- termoslika;
- kontaktni termometar;
- sušionik zraka (ulja) za kotao;
- sušionik zraka (ulja) za regulacijsku sklopku;
- regulacijska sklopka (vakuumaska) s motornim pogonom;
- rashladni sustav s upravljačkim ormarom hlađenjem i signalizacije;
- strujnim transformatorima s odgovarajućim brojem zaštitni jezgri sa sekundarnom strujom 1 A (strujni transformatori su smješteni unutar prigušnice);
- uređajem za monitoring/nadzor prigušnice s potrebnim sensorima;
- zaštitom od pada s prigušnice.

Prigušnica je opremljena uređajem za monitoring koji se integrirao u postojeći sustav monitoringa transformatorske stanice.

1.4. Prekidač 220 kV i relej za sinkrono sklapanje

Ugrađen je prekidač s gašenjem luka u SF₆ tehnici i uređajem za sinkrono sklapanje istog proizvođača, za vanjsku montažu, jednim prekidnim mjestom po polu, nazivnog napona 245 kV, nazivne struje 3150 A, nazivne kratkospojne prekidne moći 40 kA, stupnja izolacije 245 Si 460/1050 [9, 10].

Napon napajanja motora je 220 VDC, upravljački napon 220 VDC, a napon grijača 230 VAC. Prekidač ima servisna tipkala za uklop i isklop. Prekidač je izveden u skladu s najnovijim IEC preporukama te zadovoljava sljedeće osnovne tehničke zahtjeve:

- tropolni VN jednopolno upravljani prekidač 245 kV s motorno-opružnim pogonom
- za vanjsku montažu
- norma: IEC 62271-100
- nazivni napon: 245 kV
- nazivni stupanj izolacije: 245 Si460/1050
- nazivna trajna struja: 3150 A
- nazivna vršna podnosiva struja: 100 kA

- nazivno trajanje kratkog spoja: 3 s
- nazivna struja prekidanja kratkog spoja: 40 kA
- faktor prvog pola: 1,3 p.u.
- nazivni slijed operacija: O-0,3s-CO-3min-CO
- nazivni podnosivi izmjenični napon efektivne vrijednosti kod 50 Hz: 460 kV
- nazivni podnosivi udarni napon: 1050 kV
- klizna staza prema zemlji: 25 mm/kV
- klizna staza kod otvorenih kontakata: 25 mm/kV



Sl. 3.: Montirana prigušnica u TS 400/220/110 kV MELINA

2. IZBOR I DIMENZIONIRANJE OPREME UGRAĐENE U POLJU PRIGUŠNICE U TS 400/220/110 kV MELINA

Maksimalna tropska i jednopolna struja kratkog spoja na 220 kV sabirnicama u TS MELINA, sukladno studiji Proračun kratkog spoja u prijenosnoj mreži Hrvatske za nazivnu 2020. godinu (Institut za elektroprivredu i energetiku, lipanj 2010.) iznosi:

$$I_{k3} = 22,84 \text{ kA}$$

$$I_{kud} = 57,46 \text{ kA}$$

$$I_{k1} = 23,99 \text{ kA}$$

Sukladno projektnom zadatku, a zbog standardizacije VN opreme u 220 kV postrojenjima HOPS-a, Prijenosno područje Rijeka, postrojenje se dimenzionira za struje kratkog spoja iznosa 40 kA.

Sva sklopna oprema 220 kV postrojenja dimenzionirana je na sljedeće struje kvara:

- struja početnog tropskog kratkog spoja

$$I_{k3} = 40 \text{ kA}$$

- udarna struja početnog tropskog kratkog spoja

$$I_{kud} = 100 \text{ kA}$$

Prilikom detaljnih proračuna korištena je IEC norma [6].

Postojeći 220 kV sabirnički sustav u TS 400/220/110 kV MELINA izveden je cijevima iz E-AlMgSi 0,5 F22 legure, dimenzija 120×10 mm, nazivne struje 3905 A.

Spojevi između sabirničkih rastavljača u polju prigušnice izvedeni su cijevnim vodičima iz E- AlMgSi 0,5 F22 legure, dimenzija 100×8 mm.

Maksimalna brzina vjetra na lokaciji TS 400/220/110 kV MELINA koja je bila osnova za izradu svih proračuna sila vjetra na aparate i spojne vodiče te za dimenzioniranje čeličnih nosača iznosi:

$$v = 61,11 \text{ m/s} = 220 \text{ km/h}$$

Iz vrijednosti maksimalne brzine vjetra na lokaciji očito je da se radi o vrlo teškom zahtjevu za svu opremu koja se ugrađuje u predmetnom postrojenju [1, 2].

3. MAGNETSKA POLJA NAKON UGRADNJE REGULACIJSKE PRIGUŠNICE

Na visini 1 m iznad tla, magnetska indukcija regulacijske prigušnice nazivne snage 200 MVar dostiže vrijednost od $1000 \mu\text{T}$ (za područje profesionalne izloženosti) samo unutar kotla regulacijske prigušnice. U neposrednoj blizini kotla, magnetska indukcija je nešto veća od $100 \mu\text{T}$ što je granična vrijednost za javna područja.

Na visini 1 m iznad tla, u polju =D14, električno polje ne dostiže graničnu vrijednost 10 kV/m (za područje profesionalne izloženosti). U neposrednoj blizini prekidača, gdje su spojni vodiči najniži, električno polje je nešto veće od 5 kV/m što je granična vrijednost za javna područja.

Zbog navedenih činjenica, kao i rezultata izvršenih mjerenja, može se zaključiti da regulacijska prigušnica nazivne snage 200 MVar u TS MELINA, ugrađena u polju =D14, emitira električno polje i ima magnetsku indukciju takvih vrijednosti koje su niže od dopuštenih graničnih vrijednosti za područja profesionalne izloženosti koji su propisani Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja (NN 146/14, 31/19) [5].

4. ISPITIVANJE ZNAČAJKI UZEMLJIVAČKOG SUSTAVA

Ispitivanje značajki uzemljivačkog sustava u TS MELINA obavio je Končar Montažni inženjering. Na temelju rezultata mjerenja impedancije sustava uzemljenje i napona dodira u TS MELINA, a uzimajući u obzir zahtjeve iz Pravilnika o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom (NN 18/12), Pravilnika o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV (NN 105/10) i norme HRN EN 50522:2012 na koju se poziva navedeni pravilnik uzemljivački sustav TS MELINA posjeduje zadovoljavajuće uvjete bezopasnosti.

5. ANALIZA POGONSKIH STANJA USLIJED SKLOPNIH OPERACIJA REGULACIJSKE PRIGUŠNICE U TS MELINA

Sklopne operacije s visokonaponskim prigušnicama za kompenzaciju jalove snage slabo opterećenih dalekovoda relativno su česte, a u prvom redu ovise o opterećenosti mreže [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Svako uklapanje ili isklapanje prigušnice izaziva prijelazne struje i napone koji uzrokuju mehanička i dielektrička naprezanja prije svega same prigušnice, ali isto tako i susjednih elemenata rasklopnog postrojenja.

U cilju lakšeg razumijevanja predmetne problematike, vrlo je bitno poznavati teoretski opis prijelaznih pojava uzrokovanih sklopnim operacijama s regulacijskom prigušnicom.

Pri isklapanju prigušnice prekida se mala induktivna struja, nakon čega se energija akumulirana u prigušnici prazni preko kapaciteta prema zemlji. Ova pojava praćena je elektromagnetskim prijelaznim procesom i prenaponima na prigušnici, pri čemu je faktor prenapona to manji što je veća snaga prigušnice. Ova se pojava po svom frekvencijskom opsegu i visini prenapona može tretirati kao prenapon sporg porasta čela, kojem odgovara ispitni napon valnog oblika $250/2500 \mu\text{s}$. Ako pri isklapanju dođe do pojave povratnog preskoka između kontakata prekidača nastupa visokofrekvencijska prijelazna pojava, koja se može usporediti s prenaponima brzog porasta čela poput atmosferskih prenapona. Česta ponovna paljenja mogu prouzročiti visoke prenapone i dovesti do tzv. eskalacije napona. Odvodnik prenapona smješten uz

prigušnicu u prvom redu štiti prigušnicu od prenapona uzrokovanih rezanjem struja. Nadziranom sklapanjem prekidača, koji je opremljen uređajem za sinkrono sklapanje, može se smanjiti ili potpuno eliminirati pojava ponovnog preskoka u prekidaču, a isto tako utjecati na veličinu uklopne struje kod uklapanja prigušnice. Pri uklapanju regulacijske prigušnice, struje imaju povišene vrijednosti, a uslijed strujne nesimetrije pojavljuje se i nulta struja koja se zatvara kroz uzemljeno zvjezdište regulacijske prigušnice. Iznosi struja kod uklapanja, strujna nesimetrija, kao i maksimalni iznos nulte struje ovise o trenucima uklopa polova prekidača. Kod nekontroliranog uklopa su trenuci uklopa slučajni, tako su moguće različite vrijednosti uklopnih struja. Ako do uklapanja dolazi kod vrijednosti napona bliskih nuli moguće su velike uklopne i nulte struje, dok su kod uklopa pri vršnim vrijednostima napona uklopne struje manje. Provedeni su proračuni pojava izazvanih sklopnim operacijama s regulacijskim prigušnicama u 220 kV postrojenju u TS Melina (regulacijski opseg snage 60-200 MVar), pri čemu su detaljni proračuni izvršeni i za minimalnu snagu 50 MVar [9, 11].

U TS Melina uklopne struje su manje vrijednosti pri uklapanju prigušnice kod snage 50 MVar nego kod veće snage. Kod nekontroliranog uklopa prigušnice pri snazi 200 MVar uklopne struje u fazama mogu doseći iznos od 2592 A, a kroz zvjezdište prigušnice 1661 A. Kod nekontroliranog uklopa prigušnice pri snazi 50 MVar uklopne struje u fazama mogu doseći iznos od 356 A, a kroz zvjezdište prigušnice 167 A. Idealno kontrolirano sklapanje prigušnice pri snazi 200 MVar u maksimumu faznih napona rezultira uklopnim strujama u fazama koje mogu doseći iznos od 690 A, a kroz zvjezdište prigušnice 605 A. Kontrolirano sklapanje prigušnice pri snazi 50 MVar u maksimumu faznih napona rezultira uklopnim strujama u fazama koje mogu doseći iznos od 187 A, a kroz zvjezdište prigušnice 160 A. Pri prekidanju induktivnih struja bez pojave povratnog preskoka, prenaponi na prigušnici u TS Melina su veći u slučaju kada snaga prigušnice iznosi 50 MVar. Kada nisu priključeni odvodnici prenapona amplituda prijelaznog povratnog napona na prekidaču je najveća u fazi C koja se prva isklapa (amplituda je također manja u slučaju snage 60 MVar). U proračunima s odvodnicima prenapona prikazane su struje kroz odvodnike prenapona koje kod najviših prenapona ne prelaze iznos od 12 A. Uočljivo je da se prilikom rezanja struje kod prigušnice snage 50 MVar javlja najviši prenapon od 3,48 p.u. u fazi C u slučaju kada nisu priključeni odvodnici prenapona. Uz priključene odvodnike prenaponi ne prelaze 1,58 p.u. U slučaju snage prigušnice od 200 MVar prenaponi su prema očekivanjima niži. Bez priključenog odvodnika prenapona najviši prenaponi iznose 2,19 p.u., a s priključenim odvodnikom prenapona 1,55 p.u. Uslijed niske frekvencije titranja na strani prigušnice (reda 1,3 kHz) strmina prenapona je relativno mala, što je povoljno s obzirom na raspodjelu prenapona po namotu prigušnice i naponsko naprezanje prvih zavoja na vrhu namota. U svim slučajevima u kojima su u obzir uzeti odvodnici prenapona sklopni prenaponi manji su od tjemene vrijednosti podnosivog jednodimenzionalnog izmjeničnog napona frekvencije 50 Hz koji za razmatranu prigušnicu iznosi 558,6 kV (395 kV efektivno). Podnosivi atmosferski udarni napon razmatrane prigušnice iznosi 950 kV valnog oblika 1,2/50 μ s.

Maksimalna tjemena vrijednost prijelaznog povratnog napona na prekidaču javlja se u slučaju isklopa prigušnice 50 MVar te bez odvodnika prenapona iznosi 852,9 kV, dok uz odvodnike prenapona iznosi 597,6 kV. Prekidač u otvorenom položaju se ispituje podnosivim jednodimenzionalnim naponom frekvencije 50 Hz tjemene vrijednosti 650,5 kV (460 kV efektivno).

Pojava prenapona uzrokovanih ponovnim paljenjima električnog luka između kontakata prekidača uvelike ovise o konfiguraciji sustava i svojstvima prekidača. Prenaponi uslijed ponovnog paljenja električnog luka izazivaju slična naprezanja izolacije prigušnice kao atmosferski prenaponi valnog oblika 1,2/50 μ s. Ponovno paljenje električnog luka ovisi o struji prigušnice: čim je induktivna struja manja, veća je vjerojatnost ove pojave. Pri povratnom preskoku kod maksimalnog povratnog napona na prekidaču, odvodnik prenapona u svim slučajevima učinkovito ograničava prenapone na prigušnici u TS Melina. Preskoci kod višeg povratnog napona na prekidaču uzrokuju više prenapone, ali uz zaštitu odvodnikom prenapona prenaponi prema zemlji nisu kritični. Najveća strmina prenapona na prigušnici u promatranim slučajevima pojavljuje se kod preskoka pri najvećem povratnom naponu na prekidaču. Zaštitno svojstvo odvodnika prenapona dolazi do izražaja već pri smanjenju prenapona uzrokovanih rezanjem struja. Na taj se način smanjuje i mogućnost ponovnih paljenja električnog luka. Odvodnikom prenapona međutim ne može se direktno utjecati na smanjenje strmine, tj. brzinu promjene napona suprotnih polariteta. U svim slučajevima prenaponi uslijed ponovnog paljenja električnog luka manji su od tjemene vrijednosti 950 kV referentnog nazivnog atmosferskog napona izolacije, valnog oblika 1,2/50 μ s. Međutim, za izolaciju prigušnice je opasnija strmina (du/dt) nego vršna vrijednost prenapona. Kao što se može zapaziti na

izračunatim oscilogramima, vrijeme čela prenaponskog vala uslijed ponovnog paljenja električnog luka obično varira od 1 μ s do nekoliko μ s. Prenapon velike strmine se nejednoliko raspodjeljuje duž namota prigušnice, opterećujući ulazne zavojne visokim međuzavojnim naponskim razlikama. Kako je proboj u prekidaču praktički trenutačan, strminu čela određuje jedino frekvencija drugog paralelnog titranja. Strmina čela prenapona uslijed ponovnog paljenja električnog luka uzrokuje kritično naprezanje prigušnice. U provedenim analizama izračunate maksimalne strmine napona ponovnog paljenja manje su od prosječne prihvatljive kakva se može dopustiti prilikom dva sklapanja dnevno. Za eliminiranje ponovnog paljenja koristi se uređaj za sinkrono sklapanje koji je podešen tako da gašenje luka nastupi u trenutku kada su kontakti prekidača dovoljno razmaknuti, te na taj način nakon prirodnog prolaska struje kroz nulu nije više moguće ponovno paljenje električnog luka [9].

Kod isklopa prigušnice važno je da brzina porasta dielektrične čvrstoće između kontakata prekidača bude veća od strmine prijelaznog povratnog napona na prekidaču. U protivnom može doći do povratnog preskoka između kontakata prekidača te do pojave strmih prenapona na prigušnici. Zbog navedenog je bitno da mehanizam prekidača bude brz i pouzdan.

Primjenom tehnike kontroliranog isklopa u potpunosti se može eliminirati mogućnost pojave povratnog preskoka na kontaktima prekidača. Odvodnici prenapona postavljeni uz prigušnicu osiguravaju nizak nivo prenapona i nizak iznos prijelaznog povratnog napona na prekidaču.

Utjecaj kontroliranog uklopa je vidljiv iz sljedećih podataka za snagu regulacijske prigušnice 200 MVA:

Nekontrolirani uklop u $t = 15$ ms uz rasipanje polova prekidača ± 2 ms	$I_{Amax} = 2591,1$ A $I_{Bmax} = -2375,9$ A $I_{Cmax} = -2219,9$ A $I_{Zmax} = -1660,5$ A
Kontrolirani uklop u maksimumu napona	$I_{Amax} = -689,5$ A $I_{Bmax} = 670,4$ A $I_{Cmax} = 295,2$ A $I_{Zmax} = 605,0$ A
Kontrolirani uklop uz rasipanje polova prekidača ± 1 ms	$I_{Amax} = -983,3$ A $I_{Bmax} = 869,9$ A $I_{Cmax} = -853,7$ A $I_{Zmax} = 685,2$ A
Kontrolirani uklop uz rasipanje polova prekidača ± 2 ms	$I_{Amax} = -1719,0$ A $I_{Bmax} = 1528,0$ A $I_{Cmax} = -1416,9$ A $I_{Zmax} = -1110,4$ A

Na temelju provedenih analiza ukratko se može sažeti sljedeće:

- sklopni prenaponi (uslijed rezanja struje i/ili ponovnog paljenja električnog luka) općenito ne ugrožavaju izolaciju prigušnice, a upotrebom odvodnika prenapona dodatno se smanjuju;
- uklopna struja velike tjemene vrijednosti i dugačkog trajanja prigušenja, ovisno o trenutku uklopa, može izazvati velika mehanička međuzavojna naprezanja prigušnice, ali i ostale opreme u postrojenju;
- dugo vrijeme trajanja struje kroz uzemljenu nul-točku pri uklopu može izazvati probleme vezane za lažnu proradu zaštite;
- sklopni prenapon uslijed pretpaljenja električnog luka prilikom uklopa ima tjemenu vrijednost koja ne ugrožava izolaciju prigušnice, no s obzirom da je po svojem karakteru sličan ponovnom paljenju električnog luka vrlo je strm;
- u slučaju primjene uređaja za nadzirano sklapanje, prekidač će imati vremenski pomak između sklapanja pojedinih polova, jer u suprotnom ponovno paljenje ne može biti potpuno izbjegnuto u polu s najkraćim trajanjem električnog luka;
- dielektrička i mehanička naprezanja opreme sugeriraju uklop prigušnice pri nižim iznosima snage, a isklop prigušnice pri višim iznosima snage.

6. PRENAPONSKA ZAŠTITA VISOKONAPONSKE REGULACIJSKE KOMPENZACIJSKE PRIGUŠNICE U 220 kV POSTROJENJU TS 400/220/110 kV MELINA

Provedeni su proračuni pojava izazvanih sklopnim operacijama s VN prigušnicom, priključenom u 220 kV postrojenju Melina. Promatrani su slučajevi isklopa prigušnice promjenjive snage kompenzacije od 60 MVar do 200 MVar. Model za proračune zasnovan je na tehničkim podacima postrojenja i električnim parametrima mreže, dok su parametri prigušnice i uređaja u polju prigušnice usvojene prema podacima proizvođača i literaturi. Računalni proračuni prenapona izazvanih rezanjem struja provedeni su na detaljnom trolnom modelu uz pomoć EMTP-RV programa [9].

Simulirani su slučajevi rezanja struje, a proračuni su provedeni za slučajeve s i bez odvodnika prenapona u polju prigušnice. Kod isklapanja prigušnice koja ima snagu 200 MVar prenaponi su niži nego u slučaju snage 60 MVar, a uz priključeni odvodnik prenapona ispred prigušnice, prenaponi i dielektrično naprezanje izolacije je u svim slučajevima očekivano niže.

Uređaj za sinkrono sklapanje treba biti podešen tako da gašenje luka nastupi u trenutku kada su kontakti prekidača dovoljno razmaknuti, tako da nakon prirodnog prolaska struje kroz nulu nije više moguće ponovno paljenje električnog luka. Puna djelotvornost uređaja za nadzirano sklapanje može se postići samo korištenjem prekidača sa što manjim odstupanjima od podešenog trenutka uklopa. Za kontrolirani uklop bi se trebao koristiti kvalitetni prekidač koji ne bi smio imati odstupanje od podešenog trenutka uklopa veće od 1 ms.

Također su provedeni proračuni djelovanja atmosferskih prenapona u polju prigušnice. Analiziran je udar munje u stup i fazni vodič 220 kV DV Melina - Pehlin u blizini TS Melina. Atmosferski prenaponi na regulacijskoj prigušnici ne prelaze 445,0 kV, a prigušnica ima stupanj izolacije Si 950/395. Odvodnici prenapona u polju prigušnice učinkovito ograničavaju atmosferske prenapone na regulacijskoj prigušnici [9, 10].

Induktivni naponski mjerni transformatori predstavljaju najveće induktivitete u visokonaponskim rasklopnim postrojenjima (veći induktiviteti od energetskih transformatora). Zbog problema s mogućnosti nastanka rezonancije u postrojenjima s regulacijskim prigušnicama treba izbjegavati primjenu kapacitivnih naponskih transformatora, a posebno u samom polju regulacijske prigušnice i na krajevima sabirnica (mjerno polje) zbog refleksije prenaponskih valova. S obzirom na dosadašnja pogonska iskustva u slučaju visokonaponskih postrojenja s prigušnicama u TS Ernestinovo i u inozemstvu može se zaključiti da su, osim prekidača i regulacijskih prigušnica, najčešći kvarovi bili na naponskim transformatorima. Osnovni uzroci kvarova naponskih transformatora bili su sklopni i atmosferski prenaponi. Ugradnjom odvodnika prenapona može se uglavnom riješiti problem naprezanja zbog atmosferskih prenapona. Prema rezultatima proračuna amplituda atmosferskih i sklopnih prenapona, stupanj izolacije mjernog transformatora VPU-245 zadovoljava zahtjevima na mjestu ugradnje. Međutim, osim visine prenapona bitna je i brzina promjene (strmina) prenapona. Problem strmine prenaponskih valova ne može se riješiti ugradnjom odvodnika prenapona već poboljšanjem izolacijske sposobnosti naponskih transformatora (i regulacijske prigušnice i prekidača). Pri tome treba istaknuti da problem nisu nikad bile duljine klizne staze (vanjska izolacija) već proboji unutar naponskih transformatora koji mogu biti uzrokovani nelinearnom raspodjelom strmih prenapona po izolacijskom sustavu ili starenjem izolacije [9].

Strmina napona ovisi o udaljenosti od izvora prenapona i ne može se djelotvorno smanjiti ugradnjom odvodnika prenapona. U proračunima je simuliran povratni preskok na prekidaču koji izaziva izrazito strme prenapone, koji su po karakteru slični onima što nastaju prilikom sklapanja rastavljačem.

Kod sklapanja rastavljačem dolazi do većeg broja preskoka između kontakata u odnosu na sklapanje prekidačem, a svaki od preskoka generira strmi prenapon kojemu je izložena oprema u postrojenju.

Izračunata je maksimalna strmina od 215,5 kV/ μ s na regulacijskoj prigušnici. Slična strmina se, zbog blizine mjesta ugradnje, može očekivati i na naponskim mjernim transformatorima u polju prigušnice, dok će na naponskim mjernim transformatorima u susjednim poljima strmina biti blago prigušena i ovisit će o frekvenciji generiranih prenapona, uklopnom stanju i duljini spojnih vodiča između prekidača i rastavljača u polju prigušnice te mjernih transformatora u susjednim poljima. Treba istaknuti da važeće IEC norme ne propisuju način ispitivanja naponskih transformatora u blizini visokonaponskih prigušnica niti rade razliku između regulacijskih i neregulacijskih prigušnica. Prema preporukama CIGRE sadržanim u

časopisu ELECTRA [16] usvaja se da izolacija prigušnice može dva puta dnevno podnijeti prenapone zbog ponovnog paljenja. Treba istaknuti da su neki autori došli do znatno većih vrijednosti strmine od čak 800 kV/ μ s, što značajno ovisi o tipu prigušnice i konfiguraciji mreže [9, 11].

Isto tako treba uzeti u obzir i činjenicu da se sklapanje prigušnice može obavljati i više puta u jednom danu i to kod manje snage, odnosno vrlo male induktivne struje, što je još nepovoljnije. Iako su izračunate vrijednosti prenapona zbog paljenja električnog luka manje od referentnih na koji je ispitana prigušnica, često izlaganje prigušnice ovim prenaponima dovodi do njezinog ubrzanog starenja i trošenja, te je preporučljivo primijeniti mjere za njihovo ograničenje. Unutarnja izolacija namota prigušnice je klase A (papir u ulju) koja nije samoobnovljiva. Čak i ispitni naponi koji ne uzrokuju proboj izolacije mogu utjecati na njezina svojstva. Zbog toga se ovakva izolacija ispituje ograničenim brojem standardnih podnosivih ispitnih impulsa (u skladu s postupkom A, prema IEC 60060), odnosno s tri impulsa svakog polariteta, pri čemu se ispitivanje smatra uspješnim ako ne dođe do proboja. Slično razmatranje vrijedi i za naponske transformatore. Za izolaciju naponskog transformatora je puno opasnija strmina od vršne vrijednosti prenapona. Iz izračunatih oscilograma je vidljivo da vrijeme čela prenaponskog vala zbog ponovnog paljenja električnog luka obično varira od 1 μ s do nekoliko μ s. Prenapon velike strmine se nejednako raspodjeljuje duž namota pri čemu opterećuje ulazne zavoje visokim međuzavojn timer naponskim razlikama.

Međunarodna norma IEC 61869-1 [14] predviđa u okviru specijalnih ispitivanja mogućnost ispitivanja podnosivog napona mjernih transformatora odrežanim impulsnim naponima. Prema točki 7.4.1 norme primjenjuje se ispitivanje standardnim udarnim atmosferskim naponom negativnog polariteta u skladu s IEC 60060-1 [15], koji treba biti odrežan između 2 μ s i 5 μ s. Za mjerne transformatore s $U_m < 300$ kV primjenjuje se sljedeći postupak ispitivanja: 1 puni impuls, 2 odrezana impulsa te 14 punih impulsa. Prema točki 7.4.2 norme primjenjuje se ispitivanje višestrukim impulsima negativnog polariteta koji su odrezani u blizini vršne vrijednosti. Iznos vršne vrijednosti ispitnog napona treba biti 70 % od nazivnog podnosivog atmosferskog udarnog napona. Primjenjuje se ispitni napon valnog oblika 1,2/50 μ s, ukupno 600 uzastopnih impulsa, frekvencijom od jednog impulsa u minuti. U dogovoru između proizvođača i naručitelja broj primijenjenih impulsa se može smanjiti na 100. U tijeku ispitivanja ne smije doći do unutarnjeg proboja (što se može utvrditi analizom valnih oblika primijenjenih impulsnih napona), a nakon ispitivanja treba se utvrditi stanje izolacije mjerenjem parcijalnih izbijanja, plinova u ulju te kapaciteta i (koji se mjere i prije početka ispitivanja).

Budući da su analize pokazale da oprema u polju regulacijske prigušnice može biti izložena dielektričnim naprezanjima zbog prenapona koji izlaze van okvira normirane koordinacije izolacije, bilo je potrebno prilagoditi izolaciju novim uvjetima.

Naponski mjerni transformatori imaju kompleksan izolacijski sustav sastavljen od primarnog namota i kapacitivno gradirane papire izolacije, te je stoga posebna pažnja posvećena njima.

Prilagodbom izolacijskog sustava osigurana je otpornost na prenapone povećanih amplituda, povećanih strmina i broja prenapona kojima su naponski transformatori izloženi u jedinici vremena.

Naponski transformatori tipa VPU-245 s pojačanom izolacijom su ispitani i nakon provedenih ispitivanja montirani u 220 kV postrojenju s regulacijskom prigušnicom nazivne snage 200 MVA_r te su dosadašnja pogonska iskustva odlična.

ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni izazovi prilikom izrade projekta Ugradnja regulacijske prigušnice u TS 400/220/110/10 kV MELINA. U 220 kV postrojenju u TS 400/220/110 MELINA ugrađena je prigušnice nazivne snage 200 MVA_r i opremanje postojećeg 220 kV polja =D14. Ovim člankom razmotreni su razlozi za ugradnju iste, osnovni ciljevi i opseg izgradnje, tehničke karakteristike ugrađene regulacijske prigušnice i prekidača 220 kV kao i uvjeti za izbor i dimenzioniranje opreme. Zbog specifičnosti vezanih za pogonska stanja uslijed sklopkih operacija na regulacijskoj prigušnici specijalna pažnja prilikom projektiranja posvećena je izboru 220 kV prekidača i uređaja za sinkrono sklapanje. Također, posebna pažnja posvećena je prenaponskoj zaštiti visokonaponske regulacijske prigušnice.

LITERATURA

- [1] *Ugradnja regulacijske prigušnice u TS 400/220/110/10 kV MELINA*, glavni projekt, R059630, Ravel d.o.o., Zagreb, studeni 2016.
- [2] *Ugradnja regulacijske prigušnice u TS 400/220/110/10 kV MELINA*, izvedbeni projekt, R069090, Ravel d.o.o., Zagreb, rujan 2019.
- [3] IEC 60076-6:2008 *Power transformers - Part 6: Reactors*, Geneva, 2008.
- [4] *Technology and utilisation of oil-immersed shunt reactors*, Working Group A2.48, CIGRE, 2016.
- [5] *Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja*, Narodne novine 146/14, 31/19
- [6] IEC 60909-0:2016: *Short circuit currents in three phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents*, Geneva, 2016.
- [7] *Controlled switching*, Buyers and Application Guide, ABB, Edition 4, Ludvika, 2013.
- [8] *State of the Art of Circuit Breaker Modelling*, Working Group 13.01, CIGRE, 1998.
- [9] B. Filipović – Grčić, I. Uglešić: *Prenaponska zaštita visokonaponske regulacijske prigušnice u 220 kV postrojenju TS 400/220/110 kV Melina*, Zagreb, 2016.
- [10] *High voltage surge arresters*, Siemens, Catalogue, Erlangen, 2014.
- [11] IEC 62271-100-2010/A2:2017/2018: *High voltage alternating current circuit breakers*, Geneva, 2010.
- [12] B. Filipović – Grčić, I. Uglešić, S. Štefan: *Model električnog luka u SF₆ prekidaču pri prekidanju induktivnih struja*, 10. savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 2011.
- [13] *Interruption of small inductive currents*, Working Group 13.02, CIGRE, 1995.
- [14] IEC 61869-1:2007: *Instrument transformers – Part 1: General requirements*
- [15] IEC 60060-1:2010: *High voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*
- [16] S. A. Morais: *Considerations on the Specification of Circuit-Breakers Intended to Interrupt Small Inductive Currents*, ELECTRA No. 147, 1993.