Broj rada: R3-16
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-16_205

KONFIGURACIJA PARAMETRISANJE I ISPITIVANJE SISTEMA RELEJNE ZAŠTITE NA MOBILNOJ TRAFOSTANICI TS „BUROVO“ 35/6 KV

CONFIGURATION, PARAMETER SETTING, AND TESTING OF THE RELAY PROTECTION SYSTEM AT THE MOBILE SUBSTATION SS “BUROVO” 35/6 KV

Miloš FRŽOVIĆ, Electroconsult doo Novi Sad, Republika Srbija
Mihailo MILINKOVIĆ, Electroconsult doo Novi Sad, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U radu je prikazana realizacija konfiguracije parametrisanja i ispitivanja sistema relejne zaštite na mobilnoj trafostanici „TS Burovo“ 35/6 kV, snage 8 MVA, namjenjenoj napajanju rudarske mehanizacije i pratećih potrošača u okviru infrastrukturnog koridora sistema regulacije rijeke Peštan. Postrojenje je izvedeno kao kontejnersko, sa vazduhom izolovanim razvodnim postrojenjima srednjeg napona, nazivnih parametara 40,5 kV na primarnoj i 12 kV na sekundarnoj strani transformacije. Konfiguracija postrojenja obuhvata tri ćelije na 35 kV strani (dovodno, transformatosko i polje sopstvene potrošnje) i pet ćelija na 6 kV strani(transformatorsko i četiri izvodna polja), sa izolovanom neutralnom tačkom 6 kV mreže. Sistem zaštite realizovan je primjenom mikroprocesorskih zaštitno-upravljačkih jedinica u dovodnim i izvodnim poljima, dok je u transformatorskom polju na 35 kV strani primjenjen diferencijalni zaštitni uređaj za primarnu zaštitu energetskog transformatora, sa integrisanim zaštitnim funkcijama kao i funkcijama nadzora prekidača i upravljanja poljem. Parametrisanje zaštitnih funkcija izvršeno je u skladu sa rezultatima proračuna struja kratkog spoja, zahtjevima selektivnosti i vremensko-strujne koordinacije u radijalno konfigurisanoj 6 kV mreži. Ispitivanje je obuhvatilo sekundarnu injekciju strujnih i naponskih signala, provjeru vremenskih odziva, ispitivanje logike međusobnih blokada, funkcionalnu provjeru komandno-signalnih kola i testiranje komunikacije ka nadređenom sistemu upravljanja. Rezultati ispitivanja potvrdili su ispravnost podešenih karakteristika, zadovoljavajuću selektivnost i pouzdan rad zaštitnog sistema, čime su obezbjeđeni uslovi za sigurno priključenje i eksploataciju mobilne trafostanice u dinamičkim uslovima rada.

Ključne reči: Mobilna trafostanica, Sistem relejne zaštite;, Parametrisanje zaštitnih funkcija, Diferencijalna zaštitatransformatora, Mikroprocesorski zaštitni relei

ABSTRACT

This paper presents the implementation of the configuration, parameter setting, and testing of the relay protection system for the mobile substation “TS Burovo” 35/6 kV, rated at 8 MVA, intended for supplying mining machinery and associated auxiliary loads within the infrastructure corridor of the Peštan River regulation system. The installation is designed as a

Miloš Fržović milos.frzovic@electroconsult.rs; Mihailo Milinković mihailo.milinkovic@electroconsult.rs

containerized unit with air-insulated medium-voltage switchgear, rated 40.5 kV on the primary side and 12 kV on the secondary side of the transformer. The substation configuration comprises three bays on the 35 kV side (incoming feeder bay, transformer bay, and station auxiliary supply bay) and five bays on the 6 kV side (one transformer bay and four outgoing feeder bays), with an isolated neutral point of the 6 kV network. The protection system is implemented using microprocessor-based protection and control units in the incoming and outgoing feeder bays, while a transformer differential protection relay is applied in the 35 kV transformer bay as the primary protection of the power transformer, incorporating integrated protection functions as well as circuit breaker supervision and bay control functions. The parameter setting of the protection functions was performed in accordance with short-circuit current calculation results, selectivity requirements, and time-current coordination criteria in the radially configured 6 kV network. Testing included secondary injection of current and voltage signals, verification of operating times, testing of interlocking logic, functional verification of control and signaling circuits, and communication testing with the higher-level supervisory control system. The test results confirmed the correctness of the configured characteristics, satisfactory selectivity, and reliable operation of the protection system, thereby ensuring conditions for the safe connection and operation of the mobile substation under dynamic operating conditions.

Keywords: Mobile substation, Relay protection system, Protection parameter setting, Differential transformer protection, Microprocessor-based protection relays

UVOD

Razvoj elektroenergetskih sistema u savremenim uslovima eksploatacije sve više nameće potrebu za fleksibilnim, mobilnim i brzo implementarnim rješenjima u oblasti napajanja potrošača srednjeg napona. Poseban značaj imaju mobilne trafostanice, koje omogućavaju pouzdano napajanje u situacijama privremenih ili promjenljivih energetskih potreba, kao što su infrastrukturni projekti, rudarski kompleksi i udaljene industrijske lokacije.

Mobilne trafostanice predstavljaju kompleksne elektroenergetske objekte koji objedinjuju transformatorsku opremu, srednjenaponska i niskonaponska razvodna postrojenja, kao i sisteme zaštite, upravljanja i nadzora, integrisane u kompaktne i transportabilne jedinice. Njihova primena zahteva visok stepen pouzdanosti, selektivnosti i koordinacije zaštitnih funkcija, kako bi se obezbedio siguran i stabilan rad u različitim režimima pogona i promenljivim mrežnim uslovima.

U okviru ovog rada prikazana je realizacija konfiguracije, parametrisanja i ispitivanja sistema relejne zaštite na mobilnoj trafostanici „TS Burovo“ 35/6 kV, namenjenoj napajanju rudarske mehanizacije i pratećih potrošača u okviru infrastrukturnog koridora sistema regulacije reke Peštan. Specifičnost razmatranog objekta ogleda se u njegovoj kontejnerskoj izvedbi i primeni vazduhom izolovanih srednjenaponskih postrojenja, kao i u radu u radijalno konfigurisanom 6 kV distributivnom sistemu sa izolovanom neutralnom tačkom.

Poseban fokus stavljen je na projektovanje i podešavanje zaštitnih funkcija mikroprocesorskih zaštitno-upravljačkih uređaja, kao i diferencijalne zaštite energetskog transformatora, uzimajući u obzir rezultate proračuna struja kratkog spoja, zahtjeve selektivnosti i vremensko-strujne koordinacije. Pored toga, analiziran je postupak ispitivanja zaštitnog sistema, koji

obuhvata sekundarnu injekciju, proveru logičkih blokada, testiranje upravljačkih funkcija i komunikaciju sa nadređenim sistemom nadzora i upravljanja.

Cilj rada je da prikaže praktičan pristup parametrisanju i verifikaciji zaštitnog sistema mobilne trafostanice, kao i da potvrdi pouzdanost i funkcionalnu ispravnost implementiranih rešenja u uslovima dinamičkog pogona elektroenergetskog postrojenja.

1 TEHNIČKI OPIS

1.1 Dispozicija postrojenja

Energetski transformator, 1x8MVA, 35/6kV i kontejneri za 35kV i 6kV opremu, kao posebna celina, postaviće se na katastarskoj parceli KP 11/2 KO Burovo. Na istoj KP je i dalekovodni čeličnorešetkasti, UZ stub 33(24) DV 35kV "Rudnik III", sa koga vršimo i napajanje TS"Burovo 1", kablovskim priključkom na dovodnu ćeliju 35 kV, = H01. Izvodi 6kV iz nove TS 1x8MVA, 35/6kV su kablovski.

1.2 Opis postrojenja 6kV

U posebnom kontejneru zajedno sa ormanom upravljanja, razvodom sopstvene potrošnje i sistemom besprekidnog napajanja smešteno je 6kV tipski testirano metalom oklopljeno AIS - vazduhom izolovano srednjenaponsko razvodno postrojenje, sa vakuums kim prekidačima u svemu prema IEC standardima i preporukama EPS-a, karakteristika 12kV, 1250A, 25kA/1sec. Postrojenje 6kV za stepenom izolacije Si12 kV , sastoji se iz sledećih ćelija:

Tabela 1 – Razvodno postrojenje 6 kV

Naziv ćelije	Tip ćelije
L01	trafo ćelija
L02	izvodna ćelija
L03	izvodna ćelija
L04	izvodna ćelija
L05	izvodna ćelija
N5	naizmenični razvod
S5	jednosmerni razvod



Slika 1 – Spoljašnji izgled kontejnera RP 6 kV

1.3 Opis postrojenja 35kV

Razvodno postrojenje 35kV izvodi se u posebnom kontejneru. Postrojenje 35kV je za stepen izolacije Si 40,5kV, i sastoji se od 3 (tri) ćelije i to:

Tabela 2 – Razvodno postrojenje 35 kV

Naziv ćelije	Tip ćelije
H01	dovodna ćelija
H02	transformatorska ćelija
H03	ćelija transformatora sopstvene potrošnje



Slika 2 – Spoljašnji izgled kontejnera RP 35 kV

U kontejneru 35kV je modularni tipski testiran rasklopni blok sl.tipu DNF7 sa jednim sistemom sabirnica, AIS - vazduhom izolovanog, izvlačive za unutrašnju montažu, sa pristupom sa prednje strane, Ur=40,5kV, Iks=31.5(kA/1s), limena, 1250A, prefabrikovana prema IEC 62271-200.

1.4 Transformacija 35/6kV

Predviđen je uljem hlađen energetski transformator sledećih karakteristika:

Tabela 3 – Tehničke karakteristike energetskog transformatora 35/6 kV

Prenosni odnos	35±2x2,5%/6kV
Snaga Sn (MVA)	8
Učestanost f (Hz)	50
Sprega	YNd5
Napon kratkog spoja (%)	6,50
Masa ulja (tona)	2,35
Hlađenje	ONAN
Težina tansformatora (tona)	14,9



Slika 3 – Izgled energetskog transformatora 35/6 kV

Pored standardnog, transformator je opremljen sa:

- Buholc releom (dva stepena reagovanja, opomena i isključenje prekidača 35kV i 6kV);
- Kontaktnim termometrom sa dva stepena reagovanja (opomena i isključenje prekidača 35kV i 6kV);
- Pokazivačem nivoa ulja;
- Kontrolnom slavinom za uzimanje uzorka ulja;
- Dehidratorom

2 KONFIGURACIJA RELEJNE ZAŠTITE

Podešene vrednosti zaštitnih funkcija za predmetnu transformatorsku stanicu 35/6 kV definisane su na osnovu uslova i zahteva nadležnog distributivnog operatora sistema, Elektrodistribucije Srbije (EDS). Dobijene vrednosti predstavljale su osnovu za parametrizaciju mikroprocesorskih zaštitnih jedinica ugrađenih u srednjenaponske ćelije postrojenja.

2.1 Parametrisanje zaštite u RP 6kV

Konfiguracija sistema relejne zaštite u 6 kV postrojenju mobilne trafostanice „TS Burovo“ definisana je u skladu sa radijalnim karakterom mreže, zahtevima selektivnosti, kao i potrebom za visokim nivoom pouzdanosti u uslovima promenljivih režima napajanja rudarskih potrošača. Poseban akcenat stavljen je na koordinaciju zaštitnih funkcija između izvodnih i transformatorskih polja, uz primenu standardizovanih IEC funkcijskih oznaka.

Na svim ćelijama 6 kV postrojenja implementirane su osnovne i rezervne zaštitne funkcije, i to:

Tabela 4 – Zaštitne funkcije u RP 6 kV

Zaštitna funkcija	**Podešena vrednost**					**Vreme reagovanja**
	L1 – trafo polje	**L2 – izvodno polje**	**L3 – izvodno polje**	**L4 – izvodno polje**	**L5 – izvodno polje**	
Prekostrujna zaštita (IEC 50/51)	920 A	300 A	300 A	300 A	300 A	1,5 s
Kratkospojna zaštita (IEC 50/51)	2000 A	2000 A	2000 A	2000 A	2000 A	0 s
Usmerena zemljospojna zaštita (IEC 67N)	20 A	20 A	20 A	20 A	20 A	0,5 s
Zaštita od otkaza prekidača (IEC 50BF)	-	aktivan	aktivan	aktivan	aktivan	0,5 s
Zaštita otvorenog trougla (IEC 59N)	30 V	-	-	-	-	2 s

Prekostrujna zaštita (50/51) predstavlja osnovnu zaštitnu funkciju koja obezbeđuje detekciju preopterećenja i struja koje prelaze dozvoljene termičke granice provodnika i opreme. Funkcija prekostrujne zaštite realizuje vremenski zavisnu komponentu, dok funkcija kratkospojne zaštite obezbeđuje trenutno delovanje pri višim nivoima struje kvara. Podešavanja su izvršena tako da se obezbedi selektivno isključenje u skladu sa radijalnom strukturom mreže i koordinacijom zaštite između uzvodnih i nizvodnih polja.

Kratkospojna zaštita (50) implementirana je kao trenutno delujuća funkcija sa ciljem brzog isključenja u slučaju visokih struja kratkog spoja. Ova funkcija je podešena na viši prag u odnosu na vremenski zavisnu prekostrujnu zaštitu, čime se obezbeđuje minimalno vreme eliminacije teških kvarova i smanjenje termičkih i dinamičkih naprezanja opreme.

Usmerena zemljospojna zaštita (67N) implementirana je na 6 kV izvodnim ćelijama u cilju obezbeđenja dodatnog nivoa selektivnosti u uslovima jednofaznih zemljospojeva u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom. S obzirom na karakter mreže i mogućnost pojave povratnih kapacitivnih struja, primena usmerene komponente omogućava razlikovanje pravca toka zemljospojne struje, čime se obezbeđuje selektivno isključenje samo zahvaćenog izvoda.

Zaštita otvorenog trougla (59N) realizovana je primenom funkcije napona otvorenog trougla, koja omogućava detekciju nesimetričnih režima i pojave zemljospoja u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom. Ova metoda je posebno pogodna za 6 kV mreže, gde su struje zemljospoja ograničene i nedovoljno izražene za klasične strujne metode detekcije. Funkcija 59N omogućava pouzdanu detekciju i signalizaciju zemljospoja, uz mogućnost definisanja selektivnog djelovanja.

Zaštita od otkaza prekidača implementirana je kao funkcija 50BF, čiji je zadatak da u slučaju neisključenja prekidača na izvodnim ćelijama (L02,L03,L04, L05), nakon komande za isključenje inicira rezervno isključenje prekidača na trafo ćeliji L01, dok u slučaju nedelovanja prekidača na trafo ćeliji L01, nalog za isključenje se šalje na trafo ćeliju H02 u RP 35kV. Na taj način se obezbeđuje eliminacija kvara čak i u slučaju mehaničkog ili upravljačkog otkaza prekidača, čime se značajno povećava ukupna sigurnost sistema.

Kombinacijom navedenih zaštitnih funkcija (50/51, 50, 59N, 67N i 50BF) postignut je visok nivo selektivnosti, brzine delovanja i pouzdanosti rada 6 kV postrojenja, što omogućava stabilan i siguran rad mobilne trafostanice u dinamičkim pogonskim uslovima.

2.1.1 Kablovi

Veza trafo ćelije L01 i transformatora T01:
Za priključak transformatora 8 MVA na strani 6kV, sa trafo ćelijom izabrana su tri jednožilna kabla po fazi tip , 4x(3x(XHP48 1x185/25 mm², 6/10kV)), jedan za rezervu, koji su položeni u zemlju.

Provera kabla XHP48 1x185/25 mm², 6/10kV:
Usvojeni kabl je tipa XHP48 1x185/25 mm², 6/10kV koji se sme opteretiti strujom 0,72 x0,89 x3x604=1161A, koeficijent 0,72 uzima u obzir način polaganja kabla i 0,89 je temperaturni korekcioni faktor za temperaturu ambijenta 400C .

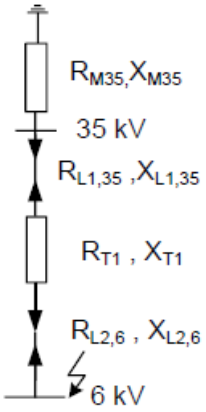
Usvojeni jednožilni kabl je tipa XHP 48, 1x185/25mm2, 6 kV koji se sme opteretiti strujom $327A$.

Nominalna struja transformatora od 8MVA na strani 6 kV je:

$$I_n = \frac{8000}{\sqrt{3} * 6} = 769{,}8\ A < 1161\ A$$

2.1.2 Proračun struja kratkih spojeva

Zamenska šema za proračun kratkog spoja na sabirnici 6kV ima sledeći oblik.



Impedansa mreže 35kV iznosi:

$$X_{M35} = \frac{1{,}1 \cdot U^2}{S_{k35}} = \frac{1{,}1 \cdot 35^2}{750} = 1{,}79\Omega$$

$$R_{M35} = 0{,}1 \cdot X_{M35} = 0{,}179\Omega$$

$$\underline{Z}_{M35} = (0{,}179 + j1{,}79)\Omega$$

Impedansa kabla 35kV na VN strani transformatora 35/6kV za dužinu od 30m je:

Kabl L1

$3x(1x95)mm^2$ $R`_L = 0{,}193\,\Omega/km$
$X`_L = 0{,}13\,\Omega/km$
$l = 0{,}03km$

$$R_{L1,35} = l \cdot R`_L = 0{,}030 \cdot 0{,}193 = 0{,}0058\Omega$$

$$X_{L1,35} = l \cdot X`_L = 0{,}030 \cdot 0{,}13 = 0{,}0039\Omega$$

$$\underline{Z}_{L1,35} = (0{,}0058 + j0{,}0039)\Omega$$

Ukupna impedansa na VN strani transformatora iznosi:

$$\underline{Z}_{35} = \underline{Z}_{L1,35} + \underline{Z}_{M35} = (0{,}185 + j1{,}794)\Omega$$

Svedeno na 6 kV stranu je:

$$\underline{Z}^{I}{}_{6} = (\frac{6}{35})^2 \cdot \underline{Z}_{35} = (0{,}005 + j0{,}053)\Omega$$

Za transformator Sn= 8 MVA:

$$P_k = 47\ kW \quad U_k = 6{,}5\%$$

$$U_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = 0{,}587\%$$

$$U_X = \sqrt{U_k{}^2 - U_r{}^2} = \sqrt{6{,}5^2 - 0{,}587^2} = 6{,}47\ \%$$

Reaktivni i aktivni otpor transformatora iznosi:

$$X_{T1} = \frac{U_x \cdot U_n{}^2}{100 \cdot S_n} = \frac{6{,}47 \cdot 6^2}{100 \cdot 8} = 0{,}29\Omega$$

$$R_{T1} = \frac{U_r \cdot U_n{}^2}{100 \cdot S_n} = \frac{0{,}587 \cdot 6^2}{100 \cdot 8} = 0{,}015\Omega$$

$$\underline{Z}_{T1} = R_{T1} + jX_{T1}$$

$$\underline{Z}_{T1} = (0{,}015 + j0{,}29)\Omega$$

Impedansa kabla(tri jednožilna kabla po fazi) 6kV na NN strani transformatora 35/6kV za dužinu od 50m je:

Kabl L2

$3x3x(1x185)mm^2$ $R'_L = 0{,}099\,\Omega/km$

$X'_L = 0{,}175\,\Omega/km$

$l = 0{,}030km$

$$R_{L2,6} = \frac{1}{3} \cdot l \cdot R`_L = \frac{1}{3} \cdot 0{,}030 \cdot 0{,}099 = 0{,}0001\Omega$$
$$X_{L2,6} = \frac{1}{3} \cdot l \cdot X`_L = \frac{1}{3} \cdot 0{,}030 \cdot 0{,}175 = 0{,}0017\Omega$$

$$\underline{Z}_{L2,6} = (0{,}0001 + j0{,}0017)\Omega$$

Ukupna impedansa na 6kV strani je :

$$\underline{Z}_6 = \underline{Z}_6^I + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L2} = (0{,}020 + j0{,}345)\Omega$$

$$|Z_6| = \sqrt{0{,}020 + 0{,}345} = 0{,}346\Omega$$

Prilikom proračuna maksimalne struje kratkog spoja mora se koristiti mreža konfiguracije koja daje minimalne impedanse, a izračunata vrednost uz nazivni napon uvećava se za 10%.

Struja tropolnog kratkog spoja je:

$$I^{"}_{k6} = \frac{1{,}1 \cdot U_n}{\sqrt{3}\,|Z_6|} = \frac{1{,}1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0{,}346} = 11{,}02\ kA$$

Simetrična struja prekidanja kratkog spoja iznosi:

$$i_{b6} = \mu I''_{k6} = 1 \cdot 10{,}72 = 11{,}02\ kA$$

$\mu \approx 1$ u slučaju kratkog spoja dalje od generatora, izvora električne energije.

Udarna struja kratkog spoja je:

$$i_{p6} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I^{"}_{k6} = 1{,}9 \cdot \sqrt{2} \cdot 11{,}02 = 29{,}5\ kA$$

$$\frac{R_6}{X_6} = \frac{0{,}020}{0{,}345} = 0{,}058 \Rightarrow \quad k = 1{,}9$$

Minimalna struja dvopolnog kratkog spoja:

$$I_{k6,2} = \frac{0{,}8 \cdot U}{2 \cdot Z_6} = \frac{0{,}8 \cdot 6}{2 \cdot 0{,}346} = 6{,}93kA$$

Termički ekvivalentna struja kratkog spoja je:

$$I_{th6} = I"_{k6} \cdot \sqrt{m + n} = 11{,}02kA$$

-m i n su numerički faktori gde je:

m = 0 za k = 1,8 i T_k= 1 sec (trajanje kratkog spoja)

n=1 za $\frac{I''_{k6}}{I_{k6}} = 1$ i T_k= 1 sec

I_{k6} – trajna struja tropolnog kratkog spoja (efektivna vrednost)

2.2 Parametrisanje zaštite u RP 35kV

Zaštitni sistem 35 kV postrojenja mobilne trafostanice „TS Burovo“ definisan je u skladu sa njegovom ulogom u napajanju 6 kV distributivne mreže i obezbeđenju sigurne eksploatacije energetskog transformatora snage 8 MVA. S obzirom na relativno jednostavnu konfiguraciju 35 kV strane (dovodno i transformatorsko polje), primenjena je kombinacija osnovnih strujnih zaštita i diferencijalne zaštite transformatora, uz naglasak na brzinu delovanja i selektivnost u zoni transformacije.

U H01 ćeliji (dovodno polje) implementirane su osnovne zaštitne funkcije koje obezbeđuju zaštitu dovodnog voda i obezbeđenje selektivnog isključenja u slučaju poremećaja sa strane napajanja. Aktivirane zaštitne funkcije su:

Tabela 5 – Zaštitne funkcije u RP 35 kV ćelija H01

Zaštitna funkcija	Podešena vrednost	Vreme reagovanja
Prekostrujna zaštita (IEC 50/51)	300 A	2 s
Kratkospojna zaštita (IEC 50/51)	2000 A	0 s

Prekostrujna zaštita podešena je tako da obuhvata režime preopterećenja i dugotrajnih povišenih struja koje mogu nastati usled poremećaja u višem naponskom nivou ili nebalansiranih režima rada sistema. Vremenska karakteristika je definisana tako da obezbedi koordinaciju sa nadređenim zaštitama u 35 kV mreži, uz dovoljan selektivni vremenski razmak.

Kratkospojna zaštita podešena je kao trenutna funkcija, sa pragom delovanja iznad maksimalnih struja opterećenja, a ispod minimalnih očekivanih struja čvrstog kratkog spoja na sabirnicama. Ova funkcija omogućava brzo isključenje u slučaju bliskih kvarova na dovodnom vodu ili sabirničkom sistemu.

U H02 ćeliji (transformatorsko polje) implementiran je prošireni zaštitni sistem koji, pored osnovnih strujnih funkcija, uključuje i diferencijalnu zaštitu energetskog transformatora, čime je obezbeđena glavna zaštita transformatora.

Tabela 6 – Zaštitne funkcije u RP 35 kV ćelija H02

Zaštitna funkcija	Podešena vrednost	Vreme reagovanja
Prekostrujna zaštita (IEC 50/51)	1000 A	po IEC krivoj
Kratkospojna zaštita (IEC 50/51)	2500 A	0,6 s
Diferencijalna zaštita transformatora (IEC 87T)	20%	-

Aktivirane zaštitne funkcije su:

- Prekostrujna i kratkospojna zaštita u ovom polju imaju ulogu rezervne zaštite, te su podešene sa većim vremenskim kašnjenjem u odnosu na zaštite na 6 kV strani, kako bi se obezbedila selektivnost i izbeglo nepotrebno isključenje transformatora u slučaju kvarova u niskonaponskoj mreži.

- Diferencijalna zaštita (87T) predstavlja osnovnu i najbržu zaštitu energetskog transformatora, zasnovanu na poređenju struja na 35 kV i 6 kV strani transformatora. Zaštita je podešena tako da reaguje na unutrašnje kvarove u zoni transformatora, uključujući međufazne kratke spojeve, zemljospojeve unutar namotaja i ozbiljne izolacione proboje.

Podešavanje diferencijalne zaštite izvršeno je uz uvažavanje:

- odnosa strujnih transformatora na obe strane transformatora,
- struje magnećenja (inrush struja) pri uključenju,
- podešenja stabilizacionog (restraining) karaktera,
- harmonijske blokade (posebno 2. harmonik za inrush uslove, kao i 5. harmonik).

Na ovaj način obezbeđena je stabilnost zaštite u tranzijentnim režimima, uz visoku osjetljivost na unutrašnje kvarove.

2.2.1 Kablovi

Veza dalekovodni ugaono-zatezni stub br. 33(24), DV „Rudnik III“, AlČ 1x150/25mm2, sa dovodnom ćelijom =H01, u 35kV postrojenju TS „Burovo 1“.
Usvojeni jednožilni kabal je tipa XHP 48, 35 kV, 1x95/16mm2 sme se opteretiti strujom Inmax= 410x 0,89=365A>134,76A .

Veza trafo ćelije (=H02) i transformtora T01:

Za priključak transformatora 8 MVA na strani 35kV , sa trafo ćelijom izabrana su tri jednožilna kabla položena u zemlju, tip XHP48, 35kV, 1x95/16 mm2, plus četvrti za rezervu.

Usvojeni jednožilni kabal je tipa XHP 48, 1x95/16mm2, 35 kV koji se sme opteretiti strujom $0{,}89 \cdot 410 = 365A$ faktor korekcije kt=0,89 za temperaturu okoline 40oC .

Nominalna struja transformatora od 8MVA na strani 35 kV je:

$$I_n = \frac{8000}{\sqrt{3} * 35} = 132{,}9\ A < 365\ A$$

2.2.2 Proračun struja kratkih spojeva

Subtranzijentna struja kratkog spoja iznosi:

$$I''_{k35} = \frac{S''_{k35}}{\sqrt{3} \cdot Un} = \frac{750}{\sqrt{3} \cdot 35} = 12{,}37kA$$

Simetrična struja prekidanja kratkog spoja iznosi:

$$i_{b35} = \mu I''_{k35} = 1 \cdot 12{,}37 = 12{,}37 \text{ kA}$$

faktor μ se određuje sa dijagrama, slika 3.13., ”Elektroenergetika” G. Dotlić-izdanje 2006.god., na strani 270 za određene odnose I"k35 /IrG i tmin, koji ima vrednost μ≈1 u slučaju kratkog spoja dalje od generatora, izvora električne energije.

I_{rG}-nazivna struja izvora

t_{min}- minimalno vremensko trajanje otvraranja prekidača.

Udarna struja kratkog spoja je:

$$i_{p35} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k35} = 1{,}8 \cdot \sqrt{2} \cdot 12{,}37 = 31{,}49 \text{ kA}$$

-faktor k se određuje sa dijagrama iz ”Elektroenergetika” G. Dotlić, za određene odnose R/X i X/R ili se takođe može izračunati približno:

$$k \approx 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{-3R/X}$$

Termički ekvivalentna struja kratkog spoja je:

$$I_{th35} = I''_{k35} \cdot \sqrt{m+n} = 12{,}37kA$$

-m i n su numerički faktori gde je:

m = 0 za k = 1,8 i T_k= 1 sec (trajanje kratkog spoja)

n=1 za $\frac{I''_{k35}}{I_{k35}} = 1$ i T_k= 1 sec

I_{k35} – trajna struja tropolnog kratkog spoja (efektivna vrednost)

Impedansa mreže 35kV iznosi:

$$X_{M35} = \frac{1{,}1 \cdot U^2}{S_{k35}} = \frac{1{,}1 \cdot 35^2}{750} = 1{,}79\Omega$$

$$R_{M35} = 0{,}1 \cdot X_{M35} = 0{,}179\Omega$$

$$\underline{Z}_{M35} = (0{,}179 + j1{,}79)\Omega$$

3 ISPITIVANJE ZAŠTITE

3.1 Primarno ispitivanje

Primarnim ubrizgavanjem struje kroz primarni deo strujnog transformatora omogućena je provera kompletnog mernog lanca. Dobijene vrednosti struje na sekundarnoj strani strujnih transformatora upoređene su sa očekivanim vrednostima na osnovu njihovog nazivnog odnosa transformacije. Na ovaj način proverena je pravilnost prenosa strujnih veličina do zaštitnih releja i mernih uređaja. Takođe je izvršena provera faznog redosleda i polariteta, čime je potvrđeno da su strujni transformatori i pripadajuća sekundarna kola pravilno povezani. Primarna injekcija se u praksi koristi upravo za potvrdu odnosa transformacije, polariteta i ispravnog povezivanja kompletne zaštitne šeme.

3.2 Ispitivanje RP 6kV

Ispitivanje zaštitnog sistema 6 kV postrojenja mobilne trafostanice „TS Burovo“ izvršeno je u cilju verifikacije ispravnosti parametrisanih podešenja, funkcionalne logike zaštitnih uređaja, kao i provere selektivnosti u radijalno konfigurisanom distributivnom sistemu. Ispitivanja su sprovedena primenom sekundarne injekcije strujnih i naponskih signala, uz simulaciju različitih režima opterećenja i kvarova.

Tokom ispitivanja provjerene su sve implementirane zaštitne funkcije, uključujući prekostrujnu zaštitu (50/51), kratkospojnu zaštitu (50/51), zaštitu otvorenog trougla (59N) i usmerenu zemljospojnu zaštitu (67N), kao i zaštitu od otkaza prekidača (50BF).

Posebna pažnja posvećena je verifikaciji selektivnosti između izvodnih polja, pri čemu su simulirani jednofazni i višefazni kvarovi na različitim pozicijama u mreži. Funkcija 67N ispitana je simulacijom promene smera zemljospojne struje, čime je potvrđena ispravna polarizacija i selektivno delovanje samo na zahvaćenom izvodu. Takođe, funkcija 59N je testirana u uslovima visokootpornih zemljospojeva, gdje je potvrđena njena osetljivost i stabilnost.

Ispitivanje zaštite od otkaza prekidača (50BF) izvršeno je simulacijom neuspešnog isključenja, pri čemu je verifikovana aktivacija rezervnih isključnih komandi u predviđenom vremenskom intervalu.

Rezultati ispitivanja pokazali su da zaštitni sistem 6 kV postrojenja ostvaruje pouzdano i selektivno delovanje u svim ispitivanim režimima, uz zadovoljavajuću koordinaciju između zaštitnih funkcija.

3.3 Ispitivanje RP 35kV

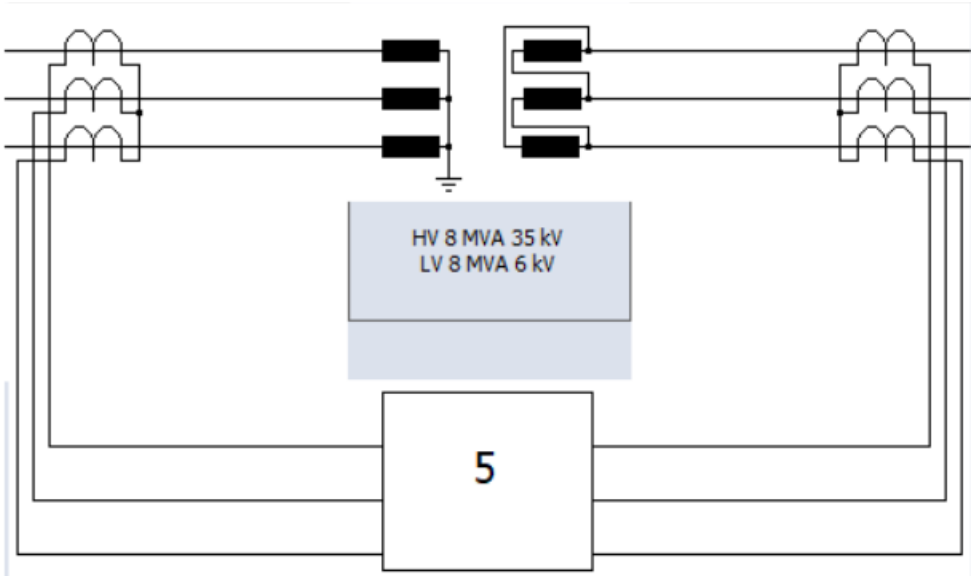
Ispitivanje zaštitnog sistema 35 kV postrojenja mobilne trafostanice „TS Burovo“ obuhvatilo je verifikaciju osnovnih strujnih zaštita u H01 i H02 ćelijama, kao i detaljno ispitivanje diferencijalne zaštite energetskog transformatora (87T) u H02 transformatorskom polju.

Ispitivanja su sprovedena metodom sekundarne injekcije, uz simulaciju spoljašnjih i unutrašnjih kvarova, kao i tranzijentnih režima pri uključenju transformatora.

U H01 ćeliji (dovodno polje) izvršena je provera prekostrujne (50/51) i kratkospojne zaštite (50/51), pri čemu je potvrđena pravilna koordinacija sa nadređenim zaštitama u 35 kV mreži, kao i selektivno delovanje u odnosu na 6 kV stranu.

U H02 ćeliji (transformatorsko polje) dodatno je ispitana diferencijalna zaštita transformatora (87T). Testiranje je obuhvatilo simulaciju unutrašnjih kvarova, spoljašnjih kvarova, kao i struju magnećenja pri uključenju (inrush režim). Posebno je verifikovana stabilnost zaštite uz aktivnu harmonijsku blokadu, čime je potvrđeno izbegavanje neželjenih delovanja u tranzijentnim režimima.

Takođe je proverena koordinacija između diferencijalne zaštite (87T) i strujnih zaštita (50/51), pri čemu je potvrđeno da diferencijalna zaštita ima prioritetno i trenutno djelovanje u zoni transformatora, dok strujne zaštite imaju rezervnu ulogu.



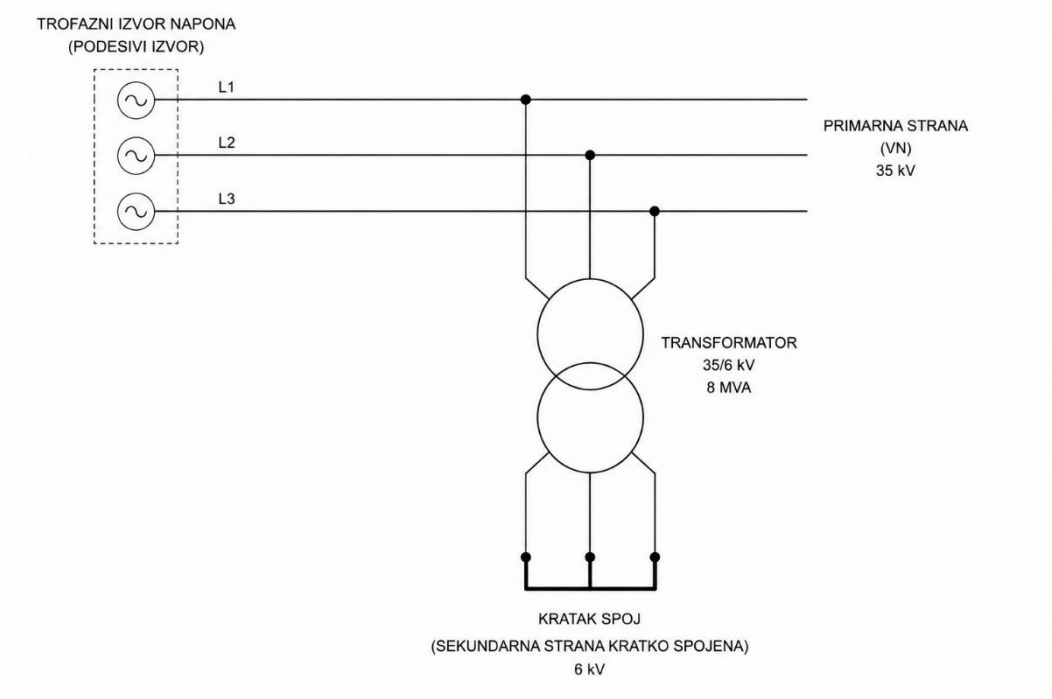
Slika 4 – Pojednostavljena šema diferencijalne zaštite transformatora

Rezultati ispitivanja pokazali su da 35 kV zaštitni sistem ostvaruje visok nivo pouzdanosti i brzine djelovanja, uz potpunu funkcionalnu ispravnost diferencijalne zaštite i adekvatnu selektivnu koordinaciju sa ostalim zaštitnim funkcijama.

3.4 Međusobno ispitivanje

U cilju kompletne verifikacije funkcionalne ispravnosti i međusobne koordinacije zaštitnih sistema 35 kV i 6 kV postrojenja mobilne trafostanice „TS Burovo“, izvršen je ogled kratkog spoja. Ovim ispitivanjem proverena je celokupna logika delovanja zaštita, uključujući selektivnost, brzinu isključenja, kao i ispravnost signalno-komandnih i blokadnih veza između pojedinačnih polja.

Ogled kratkog spoja sproveden je uz kontrolisano uspostavljanje simuliranih kvarnih režima. Posebna pažnja posvećena je koordinaciji delovanja između 35 kV transformatorskog polja (H02), 35 kV dovodnog polja (H01) i 6 kV izvodnih ćelija, sa ciljem potvrde ispravne selektivnosti u realnim uslovima prenosa kvara kroz transformator.



Slika 4 – Pojednostavljena šema diferencijalne zaštite transformatora

Tokom ispitivanja analiziran je scenario simetričnog trofaznog kratkog spoja na 6 kV sabirnici. Rezultati ispitivanja pokazali su da zaštite 6 kV nivoa deluju primarno i selektivno u slučaju kvarova u distributivnoj mreži, dok 35 kV zaštite ostaju stabilne pri spoljašnjim kvarovima (through-fault režim). Diferencijalna zaštita transformatora (87T) pokazala je ispravno i brzo delovanje isključivo u slučaju simuliranih unutrašnjih kvarova, bez neželjenih aktiviranja tokom spoljašnjih kvarova i tranzijentnih stanja.

Takođe je potvrđena ispravna funkcionalnost zaštite od otkaza prekidača (50BF), koja je u simuliranim uslovima nedelovanja prekidača aktivirala rezervne isključne komande i time obezbedila eliminaciju kvara u sistemu.

Posebno je analizirana koordinacija vremena delovanja između 6 kV i 35 kV zaštita, pri čemu je potvrđeno da je ostvarena odgovarajuća vremenska selektivnost, bez preklapanja zona delovanja. Time je obezbijeđeno da se kvarovi eliminišu na najnižem mogućem naponskom nivou, uz minimalan uticaj na ostatak postrojenja.

Na osnovu sprovedenog ogleda kratkog spoja potvrđena je funkcionalna ispravnost i međusobna koordinacija svih zaštitnih sistema, kao i njihova spremnost za pouzdan rad u realnim eksploatacionim uslovima mobilne trafostanice.

4 ZAKLJUČAK

U radu je prikazana realizacija konfiguracije, parametrizacije i ispitivanja sistema relejne zaštite mobilne trafostanice „TS Burovo“ 35/6 kV, sa posebnim fokusom na zaštitu energetskog transformatora i 6 kV distributivne mreže u radijalnoj konfiguraciji. Razmatrano postrojenje, kao kontejnersko i mobilno rešenje, zahtevalo je pažljivo projektovanje zaštitnih funkcija kako bi se obezbedio visok nivo pouzdanosti i selektivnosti u uslovima promenljivog opterećenja rudarskih potrošača.

Na 6 kV strani implementirane su osnovne i proširene zaštitne funkcije, uključujući prekostrujnu (50/51), kratkospojnu (50), zemljospojnu zaštitu (59N), usmjerenu zemljospojnu zaštitu (67N) i zaštitu od otkaza prekidača (50BF). Njihovim pravilnim podešavanjem i koordinacijom postignuta je selektivna eliminacija kvarova uz minimalno vrijeme isključenja i bez nepotrebnog isključenja zdravih delova mreže.

Na 35 kV strani, u dovodnom i transformatorskom polju, primenjene su strujne zaštite (50/51) kao i diferencijalna zaštita transformatora (87T) kao osnovna zaštita energetskog transformatora. Posebno je potvrđena stabilnost diferencijalne zaštite u tranzijentnim režimima, uključujući struju magnećenja pri uključenju i spoljašnje kvarove.

Ispitivanja sprovedena metodom sekundarne injekcije, kao i ogled kratkog spoja, pokazala su da svi zaštitni elementi funkcionišu u skladu sa projektovanim podešenjima. Potvrđena je ispravna selektivnost između 6 kV i 35 kV nivoa, kao i pouzdana koordinacija vremensko-strujnih karakteristika zaštita.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je zaštitni sistem mobilne trafostanice ispravno projektovan, pravilno parametrisan i uspešno verifikovan kroz ispitivanja. Time su obezbeđeni uslovi za siguran, pouzdan i stabilan rad postrojenja u eksploatacionim uslovima, uz visoku otpornost na pojavu različitih tipova kvarova u elektroenergetskom sistemu.

LITERATURA

[1] Sveska 5a - Mobilna TS-Elektro deo sa crtezima
[2] Tehničke preporuke Elektrodistribucije Republike Srbije
[3] ”Elektroenergetika” G. Dotlić