

Dodatak D

Zaštita transformatora pri HE

D.1 Opis sistema

U toku eksploatacije u hidroelektrane koja ima priključene nadzemne 110 kV i 35 kV vodove desilo se u kratkom roku nekoliko kvarova izolacije na strani 35 kV. Kvarovi su se pojedinačno desili na 35 kV namotaju suvog transformatora sopstvene potrošnje, proboj 35 kV kablovske završnice, havarija 35 kV odvodnika prenapona, havarija 35 kV osigurača sa pojavom međufaznog luka praćenog eksplozijom. Dvostruki nadzemni vod nazivnog napona 35 kV ispred transformatorske stanice je na čelično rešetkastim stubovima, postavljenim na stenovitom planinskom terenu. Vod je svojim položajem veoma eksponiran atmosferskim udarima (videti sliku D.1 levo). Desno je prikazana fotografija priključka 35 kV voda na zgradu, sa odvodnicima prenapona i 9 m dugačkim spustom od odvodnika do uzemljivača.

Radi lakšeg modelovanja dvosistemski nadzemni vod je modelovan monofaznom zamenskom šemom, jer je predpostavljeno da će prilikom udara u zaštitno uže ili vrh stuba, zbog velikog otpora uzemljenja, doći do preskoka na sve tri faze oba sistema, tako da se može smatrati da talas nailazi po jednom ekvivalentnom provodniku dostruko manje karakteristične impedanse. Zamenska šema sistema data je na slici D.2.

Oznake na slici D.2 imaju sledeće značenje:

$S1, S2, S3$ -vrhovi stubova ispred zgrade postrojenja,

d_1, d_2, d_3 -dužine prvih raspona,

F -fazni provodnik,

Z -zaštitno uže,



Slika D.1: Prilazni dalekovod 35 kV (levo) i priključak na zgradi sa odvodnicima prenapona (desno)

H_z -visina zaštitnog užeta,

H_F -visina faznog provodnika,

H_o -dužina zemljovoda od odvodnika do uzemljivača,

H_z -visina zaštitnog užeta,

$P1, P2$ -izvlačivi 35 kV prekidači u dalekovodnom i transformatorskom polju,

d_k -dužina kabla od priključka na zgradi do sabirnica,

d_t -dužina kabla od sabirnica do transformatora.

Na slici D.3 dat je ekranski prikaz šeme iz programa GROM za slučaj atmosferskog pražnjenja u prvi raspon između prvog i drugog stuba ispred ulaza u transformatorsku stanicu.

Na slici D.3 oznake imaju sledeće značenje:

CN - ulazna kapacitivnost naponskog mernog transformatora,

CE -ulazna kapacitivnost namotaja 35 kV energetskog transformatora sopstvene potrošnje,

$OP1$ -odvodnik prenapona ispred ulaza u zgradu postrojenja,

SAB -sabirnice postrojenja.

Na visinu prenapona najveći uticaj imaju dužina spusta od odvodnika do uzemlji-vača H_o , zatim ukupna dužina kablova od priključka na zgradi (odnosno od odvodnika prenapona) do transformatora, kada su prekidači $P1$ i $P2$ zatvoreni ($d = d_k + d_t$) i otpornost uzemljenja stubova. Kod statističkog proračuna uticaj ima visina najvišeg provodnika (u ovom slučaju zaštitnog užeta), kao i godišnja gustina atmosferskih pražnjenja u ravnu površinu zemlje n_G . Kod determinističkog proračuna visina provodnika i dužina raspona imaju veoma mali uticaj na rezultate proračuna, ali zato najvažniji uticaj imaju izabrani slučajni parametri atmosferskog pražnjenja (amplituda struje i strmina čela strujnog talasa), kao i mesto udara na vodu.

U proračunu su korišćeni najvažniji parametri mreže koji su dati u tabeli D.1. Za

Tabela D.1: Najvažniji parametri analizirane mreže

$H_o(\text{m})$	9
$d_k(\text{m})$	30
$d_t(\text{m})$	15
$d_o(\text{m})$	3
$R_s \Omega$	15

mrežu 35 kV koja radi sa izolovanom neutralnom tačkom kod koje se zemljospoj jedne faze ne isključuje automatski, odvodnik prenapona se bira tako da može trajno da podnese složeni napon u slučaju zemljospoja.

Odvodnik prenapona je izabran na osnovu sledećeg kriterijuma:

$$U_r = \frac{U_m \cdot K_s}{K_f} \quad (\text{D.1})$$

gde je:

U_r -naznačeni napon odvodnika prenapona,

U_m -maksimalni trajno dozvoljeni napon mreže, $U_m = 38$ kV za sistem nazivnog napona 35 kV,

K_s -koeficijent sigurnosti, koji za srednjenaponske mreže ima vrednost 1.1, a za mreže 110 kV i više 1.05.

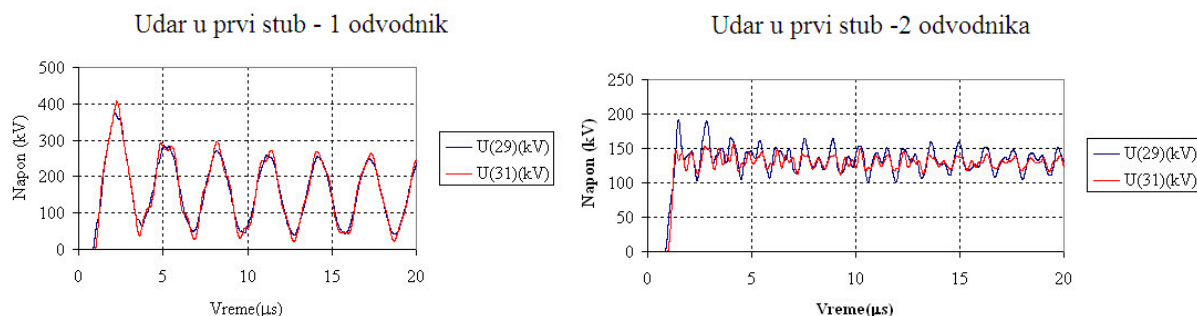
K_f -faktor proizvođača, za odvodnike firme ABB ima vrednost 0.8.

Kada se izračuna, minimalna vrednost naznačenog napona odvodnika je 52.25 kV. Zato je izabran odvodnik prenapona čiji je naznačeni napon 54 kV.

D.2 Deterministički proračun

U ovom primeru koji je rađen determinističkom metodom, za najkritičnije mesto pražnjenja je izabran stub S1 na slici D.2, odnosno čvor 16 u šemi na slici D.3. Amplituda struje pražnjenja je usvojena da bude 121 kA, a strmina struje 43 kA/ μ s. To su veličine čije je premašnje moguće sa verovatnoćom od 2% prema usvojenoj statističkoj raspodeli amplituda i struja atmosferskih pražnjenja prema [42], [43]. U klasičnom proračunu je kriterijum za ispravno odabrani podnosivi napon izolacije, da prenaponi ne pređu podnosivi udarni atmosferski napon, koji za mrežu 35 kV iznosi 170 kV, koliko iznosi ispitni napon za izolaciju novog uređaja. Zbog mogućeg slabljenja izolacije usled starenja, uslova eksploatacije i drugih faktora, uvodi se koeficijent sigurnosti koji se usvaja $K_s = 1.15$ prema [12] za staru izolaciju. Kriterijum proboja za ostarelu izolacija je da maksimalni izračunati prenapon u determinističkom proračunu pređe vrednost $170/1.15=148$ kV.

Rezultati determinističkog proračuna u uslovima pražnjenja u prvi stub ispred postrojenja (čvor 16) prikazani su u obliku talasnog oblika prelaznog napona na energetskom transformatoru U(31) i na mernom naponskom transformatoru U(29) na slici D.4.



Slika D.4: Talasni oblik napona na naponskom mernom transformatoru i energetskom transformatoru kada se primenjuje 1 set odvodnika (levo) i dva seta odvodnika (desno)

U tabeli D.2 prikazani su rezultati determinističke analize prenapona kada se primenjuje samo 1 set odvodnika prenapona i kada se primenjuju 2 seta odvodnika prenapona.

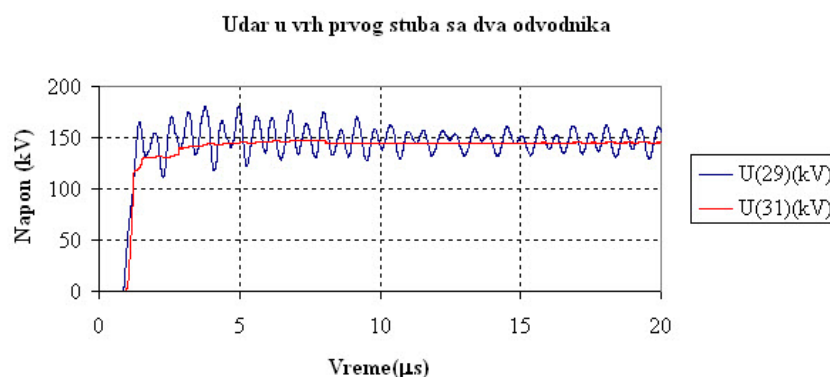
Tabela D.2: Rezultati determinističke analize prenapona kada se primenjuje samo 1 set i kada se primenjuju 2 seta odvodnika prenapona

Jedan set odvodnika		Dva seta odvodnika	
U _{max} (29)(kV)	U _{max} (31)(kV)	U _{max} (29)(kV)	U _{max} (31) (kV)
375.9	407.3	191.5	155.8

Može se uočiti da je energetski transformator zaštićen korišćenjem odvodnika neposredno uz transformator (bez uvažavanja sigurnosnog koeficijenta), dok je naponski

transformator prema kriterijumima za deterministički prilaz koordinacije izolacije ugrožen.

Proračun je ponovljen kada je odvodnik prenapona postavljen direktno na transformator, paralelno prolaznom izolatoru. U tom slučaju je dužina veze $d_o = 0$. Vremenski dijagram napona u ovom slučaju dat je na slici D.5.



Slika D.5: Talasni oblik napona kada je odvodnik postavljen direktno na transformator

Vrednosti maksimalnog napona su dati u tabeli D.3.

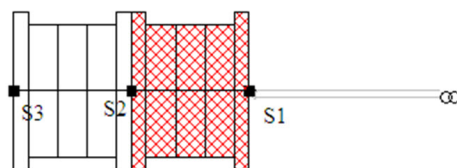
Tabela D.3: Rezultati determinističke analize prenapona kada se koriste 2 seta odvodnika od kojih je jedan fiksiran na samom energetsom transformatoru

Dva seta odvodnika	
U _{max} (29)(kV)	U _{max} (31)(kV)
180.4	147.8

Može uočiti da je u ovom slučaju energetska transformator zaštićen, čak kada je kriterijum zaštite uvažavanje koeficijenta sigurnosti K_s , odnosno kada je granični dozvoljeni napon 148 kV.

D.3 Statistički proračun

Proračun je ponovljen statističkom metodom za raspone d_2 i d_3 koji su jako izloženi udarima zbog reljefa. Prvi raspon je ekraniran branom i građevinskom konstrukcijom. Proračuni su rađeni kada je mesto udara varirano duž drugog i trećeg raspona ispred postrojenja, na svakom rasponu sa po 5 lokacija udara, što znači da je mesto udara varirano na 10 lokacija. Skica atraktivne zone pojedinih lokacija i segmenti na kojima je variranje rađeno prikazani su na slici D.6.



Slika D.6: Atraktivne zone voda na 2 raspona

Šrafirana površina označava da se radilo o analizi udara u prvi raspon. Svaki od pravougaonika označava atraktivnu zonu segmenta voda. $S1$, $S2$ i $S3$ su stubovi računati od najbližeg postrojenja. Usvojena je godišnja gustina udara od $n_G = 5.41$ udar/god,km².

Usvojen je statistički kriterijum za procenu ugroženosti izolacije opreme u postrojenju dat u tabeli D.4. Rezultati se označavaju se MTBF od engleskog Mean Time Between Failures, odnosno srednje vreme između kvarova.

Tabela D.4: Kriterijum ugroženosti izolacije kod statističkog proračuna

Naziv elementa	MTBF
Veliki energerski transformator	600
Manji energetski transformator	400
Merni transformatori	200

Rezultati statističkog proračuna su dati u tabeli D.5. Rezultati predstavljaju vreme između dva kvara izolacije energetskog transformatora i naponskog transformatora, izraženo u godinama, kada je primenjen 1 ili 2 seta odvodnika prenapona.

Tabela D.5: Vreme između dva kvara izolacije energetskog transformatora i naponskog transformatora kada je primenjen jedan ili dva odvodnika prenapona

Jedan set odvodnika		Dva seta odvodnika	
MTBF(29)(god)	MTBF(31)(god))	MTBF(29)(god)	MTBF(31) (god)
12.3	22.4	244.6	∞

Može se uočiti da kada se primenjuju dva seta odvodnika, energetki transformator u čvoru 31 je potpuno zaštićen, a naponski transformator takođe zadovoljava kriterijum iz tabele D.4. Ukoliko se zadrži postojeće rešenje sa 1 setom odvodnika ispred postrojenja, očekivano vreme između kvarova izolacije je MTBF=12.3 god, što je neprihvatljivo.

Uzroci sadašnje loše prenaponske zaštite postrojenja su sledeći:

- Energetski transformator kao najvažniji objekat koji treba zaštititi, mora biti zaštićen odvodnikom prenapona što je bliže moguće priključcima transformatora, a

najbolje je postavljanje na samu konstrukciju transformatora paralelno izolaciji. U zatečenom stanju transformator je nezaštićen.

- Velika dužina zemljovoda između donjeg priključka odvodnika, odnosno konzole na kojoj stoje odvodnici ispod zateznih izolatora na zidu zgrade i priključka za uzemljivač.
- Zbog izolovanog zvezdišta i struje zemljospoja koja se ne isključuje, već samo signalizira, mora se odabrati visok naznačeni napon odvodnika prenapona, što znači da je njegov zaštitni nivo za oko 45 % viši nego kada bi neutralna tačka bila direktno uzemljena.

Zahvalnica

Zahvaljujemo kompaniju Elnos Banja Luka za angažovanju za rešavanja problema prenapona u HE Bočac. Istraživanje je rađeno 2015 god.