

Doc.dr.sc. Srđan Skok, dipl.ing.el.
Tehnički fakultet Sveučilište u Rijeci
srdjan.skok@riteh.hr
Dean Dereani, dipl.ing.el.
Dalmacijacement d.d., Split
dean.dereani@cemex.hr

Vedran Kirinčić, dipl.ing.el.
Tehnički fakultet Sveučilište u Rijeci
vedran.kirincic@riteh.hr

PODEŠENJA ZAŠTITA U KOMPLEKSU TVORNICI „DALMACIJACEMENT“

SAŽETAK

U radu je opisana metodologija izbora podešenja relejne zaštite obzirom na specifičnosti elektroenergetskog sustava u kompleksu tvornica „Dalmacijacement“. Plan podešenja zaštite je izrađen sukladno zahtjevima za pouzdanost pogona, te poštujući zadane veličine određene mrežnim pravilima Hrvatske elektroprivrede. Zaštita je podešena na način da se ostvaruje željena vremenska i prostorna selektivnost (isključenje samo kvarom zahvaćenog dijela mreže u što je moguće kraćem vremenu). Dodatni zahtjevi su se pojavili obzirom na činjenicu da postoji više različitih naponskih razina povezanih u jedinstven EES. Nužno je bilo, s teoretskog stajališta iz područja relejne zaštite i zatim izradom matematičkog modela, sagledati elektroenergetsku mrežu kompleksa tvornice te dati preporuke za kvalitetno podešenje zaštite. U radu je prikazana teoretska osnova te je dan primjer podešenja zaštite u kompleksu tvornica. Nakon matematičkog modeliranja elemenata elektroenergetskog sustava u kompleksu tvornica, provedeni su proračuni tokova snaga i struja kratkog spoja koji su bili temelj, uključujući ispitne protokole, za preporuke podešenja sustava relejne zaštite.

Ključne riječi: relej, zaštita, podešenje

SETTING THE RELAY PROTECTION SYSTEM OF „DALMACIJACEMENT“ PLANTS

SUMMARY

The purpose of this paper is to describe the methodology used to set the relay protection system of “Dalmacijacement” plants, with regard to electric power system characteristics. Protection setting plan was made in accordance with the plant reliability demands and with the respect to the grid codes. The protection was set to achieve desired time and space selectivity (tripping only the faulted part of the grid as soon as possible). Additional demands emerged because of the several voltage levels connected into unique electric power system. It was necessary to analyze the network from the relay protection theoretical point of view and to build mathematical model in order to give recommendations for quality protection setting. In this paper it was presented theoretical basis and it is given the example of relay setting of the plants. After modeling the elements of the cement plants, power flow and short circuit calculations were carried out and used, together with the test protocols, as a basis for the setting of the relay protection system.

Key words: relay, protection, setting

1. UVOD

1.1. Elektroenergetski sustav u kompleksu tvornica „Dalmacijacement“

Proizvodni kompleks tvornica „Dalmacijacement“ čine tri cementare, „10. kolovoz“, „Sv. Kajo“ i „Sv. Juraj“. Elektroenergetski sustav obuhvaća naponske nivoe 35 kV, 6 kV i 3 kV. Topologija mreže u pojedinom objektu je radijalna, gdje je preko energetske transformatora ostvareno napajanje visokonaponskih motora i ostalih trošila priključenih na 6 kV sabirnice (u cementarama „Sv. Juraj“ i „Sv. Kajo“), odnosno na 3 kV sabirnice (u cementari „10. kolovoz“).

Cementara „Sv. Juraj“ spojena je s tri 35 kV kabela na TS Kaštela 110/35 kV. U normalnom pogonu napajanje je ostvareno preko dva transformatora nazivne snage 63 MVA u TS Kaštela 110/35 kV. Energetska postrojenja cementare „Sv. Kajo“ mogu se napajati preko 35 kV kabela iz cementare „Sv. Juraj“ ili preko 35 kV kabela iz TS Meterize 110/35 kV. Napajanje cementare „10. kolovoz“ ostvareno je također iz TS Meterize preko 35 kV kabela. Pritom je u navedenoj TS Meterize 110/35 kV za napajanje ovih dviju cementara u normalnom pogonu angažiran jedan transformator nazivne snage 40 MVA.

Za određivanje nadomjesnog modela vanjske mreže korišteni su podaci proračuna struja kratkog spoja iz studije Instituta za elektroprivredu [1], za nazivnu 2010. god. u planiranoj prijenosnoj mreži EES-a Hrvatske.

Udjeli jednopolnog kratkog spoja su u proračunima struja kratkog spoja u postrojenjima cementara određeni uzemljenjem transformatora u TS Kaštela i TS Meterize na 35 kV strani, odnosno uzemljeni su preko otpornika, te im je jednopolna struja kratkog spoja ograničena na 300 A, a postrojenja 6 kV u cementari „Sv. Juraj“ i „Sv. Kajo“, odnosno postrojenja 3 kV u cementari „10. kolovoz“ su izolirana.

U suradnji sa stručnim osobljem cementara „10. kolovoz“, „Sv. Kajo“ i „Sv. Juraj“ prikupljeni su osnovni tehnički podaci o transformatorima, kabelima i visokonaponskim motorima ugrađenim u energetska postrojenja navedenih cementara, neophodni za izradu matematičkog modela te proračune tokova snaga i struja kratkog spoja. Za 35 kV, 6 kV i 3 kV kabele ugrađene u postrojenja cementara dobiveni su podaci o nazivnom naponu, tipu i presjeku, te duljini kabela. Podaci za jedinične otpore, reaktancije i dozemne kapacitete navedenih kabela uzeti su iz kataloga [2, 3].

U sva tri objekta tvornice „Dalmacijacement“ određena su osnovna uklopna stanja, te ostala moguća i realna uklopna stanja postrojenja, određeno je uklopno i pogonsko stanje elektroprivredne mreže na koju je spojen elektroenergetski sustav tvornica „Dalmacijacement“. Prikupljeni su i analizirani postojeći ispitni protokoli postojećih zaštitnih uređaja (releja).

2. PRORAČUN TOKOVA SNAGA

2.1. Matematički model za proračun tokova snaga

Proračun tokova snaga jedan je od osnovnih proračuna kojim se utvrđuju strujne i naponske prilike za definirana uklopnih i pogonskih stanja mreže. U proračunima tokova snaga čvorišta mreže se svrstavaju u tri kategorije:

- PQ čvorišta (čvorišta tereta) za koja se zadaje djelatna i jalova snaga (proizvodnja-potrošnja),
- PV čvorišta (generatorska čvorišta) za koja se zadaje proizvodnja (engl. injection) djelatne snage i iznos napona,
- regulacijsko (bilančno, referentno) čvorište u kojem se zadaje napon po iznosu i faznom pomaku.

Proračun tokova snaga se u osnovi svodi na rješavanje sustava nelinearnih jednadžbi, budući da su u elektroenergetskom sustavu poznate snage čvorišta, a ne struje. Jedna od najčešćih metoda za rješavanje takvog sustava jednadžbi je iterativna Newton-Raphsonova metoda [4].

Ukoliko se za napone i admitancije grana uvedu sljedeće oznake:

$$\overline{V}_i = V_i \angle \delta_i \quad \overline{V}_j = V_j \angle \delta_j \quad (1)$$

$$\overline{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \Theta_{ij} \quad (2)$$

za djelatnu i jalovu snagu u čvorištima mreže mogu se napisati sljedeći izrazi:

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i Y_{ij} V_j \cos(\delta_i - \Theta_{ij} - \delta_j) \quad (3)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i Y_{ij} V_j \sin(\delta_i - \Theta_{ij} - \delta_j) \quad (4)$$

Osnovna matrična jednadžba na kojoj se temelji ovaj iterativni postupak može se napisati u sljedećem obliku:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

Članovi Jacobijane dobiju se deriviranjem izraza (3) i (4) po kutu δ i iznosu napona V . Obzirom da je utjecaj promjene iznosa napona čvorišta na djelatnu snagu neznatan, a isto tako je i zanemariv utjecaj promjene kuta napona čvorišta na jalovu snagu, često se u Newton-Raphsonovom iteracijskom postupku zanemaruju podmatrice J_2 i J_3 , te matrična jednadžba (5) prelazi u oblik (6). U tom slučaju mogu se odvojeno promatrati jednadžbe utjecaja djelatne snage na kut napona, odnosno jalove snage na iznos napona (Decoupled Newton-Raphson).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

Veličina podmatrice J_1 je $n - 1$, a veličina podmatrice J_4 je $n - n_{PV} - 1$ pri čemu je n ukupni broj čvorišta promatrane mreže, a n_{PV} broj PV čvorišta.

Rezultat proračuna tokova snaga su iznosi i kutovi napona u svim čvorištima mreže na temelju kojih se mogu odrediti i tokovi snaga po granama. Na temelju tih rezultata moguće je odrediti proizvodnju regulacijskog čvorišta, preopterećenja vodova i transformatora, čvorišta s naponima izvan dozvoljenih granica, te ona proizvodna čvorišta koja zbog nedostatka ili viška jalove snage nisu u stanju održati zadani napon na sabirnicama generatora.

2.2. Rezultati proračuna tokova snaga

Prilikom podešenja nadstrujne zaštite treba voditi računa da strujna podešenja ne budu blizu maksimalnih pogonskih struja u postrojenju. Stoga su svi proračuni tokova snaga (struja) provedeni za pretpostavljena maksimalna opterećenja, odnosno da su svi motori u pogonu. Što se uklopnog stanja tiče, u proračunima je pretpostavljeno da se dio transformatorskih stanica napaja sa sabirnicama TS3 6 kV – I, a drugi dio sa sabirnicama TS3 6 kV – II, što je u normalnom pogonu uvijek slučaj, zbog smanjenja struja kratkog spoja.

Proračun tokova snaga za energetska postrojenja u cementari "Sv. Kajo" također je proveden za pretpostavljeno maksimalno pogonsko stanje. Pri tom su, radi podešenja zaštite napojnih 35 kV kabela, proračuni provedeni za oba načina napajanja cementare (iz cementare "Sv. Juraj" i iz TS Meterize 110/35 kV). Slično kao i u cementari "Sv. Juraj" i ovdje je pretpostavljeno da su glavne sabirnice 6 kV razdvojene, te da se dio VN motora i transformatora 6/0,4 kV napaja preko sustava 6 kV – I, odnosno 6 kV – II. Pri tom se vodilo računa da opterećenja budu ravnomjerno raspoređena na transformatore 35/6 kV, preko kojih se napajaju ova dva navedena sustava. Iz rezultata je zaključeno da su pogonske struje gotovo identične na 6 kV razini postrojenja u oba razmatrana slučaja, jer su one određene opterećenjem, a ne izvorom napajanja.

Slično kao i za prethodne dvije i za cementaru "10. kolovoz" proračuni tokova snaga (struja) su provedeni za pretpostavljeno maksimalno pogonsko stanje, što je u stvarnosti malo vjerojatno, ali je potrebno radi selektivnog podešenja relejne zaštite. Napajanje ove cementare je moguće samo iz TS Meterize 110/35 kV, tako da su proračuni i provedeni samo za taj slučaj. Ponovno su opterećenja raspodijeljena na sabirnice 3 kV – I i sabirnice 3 kV – II glavne transformatorske stanice.

3. PRORAČUN STRUJA KRATKOG SPOJA

3.1. Proračun struja kratkog spoja prema standardu IEC 909

Proračun struja kratkog spoja izveden je prema međunarodnom standardu IEC 909/1988 [5]. Prema navedenom standardu pretpostavlja se da je mreža prije nastanka kvara neopterećena, a ovisno o naponskoj razini mreže i vrsti kratkog spoja koji se računa (max. ili min.) definira se naponski faktor c , kojim se množi nazivni napon u svim čvorištima mreže. Za određivanje maksimalnih struja kratkog spoja, navedeni faktor c iznosi 1,1 (10 % viši napon od nazivnog) za sabirnice u mrežama nazivnog napona iznad 1 kV, a u mrežama niskog napona taj faktor ima vrijednost 1.

Potrebno je uočiti razliku između početnog i prijelaznog kratkog spoja, mjerodavnih za određivanje udarnih, odnosno rasklopnih struja. Za proračun početnog kratkog spoja generatori i VN motori se modeliraju njihovim početnim reaktancijama, dok se u slučaju prijelaznog kratkog spoja generatori modeliraju početnim, a VN motori prijelaznim reaktancijama. Osim za ove dvije vrste kratkog spoja proveden je i proračun trajnog kratkog spoja, a rezultati tog proračuna mjerodavni su za zagrijavanje elemenata EES-a. U tom proračunu ne uzima se u obzir utjecaj motora, a generatori se modeliraju prijelaznim reaktancijama.

Prilikom određivanja udarne struje kratkog spoja polazi se od efektivne vrijednosti simetrične komponente struje početnog kratkog spoja, a uz pomoć omjera X/R uzme se u obzir utjecaj istosmjerne komponente. Ako se za simetričnu komponentu struje početnog kratkog spoja koristi oznaka I_k'' , tada se udarna struja kratkog spoja (engl. peak current), tj. prva tjemena vrijednost struje kratkog spoja, dobiva prema izrazu:

$$I_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (7)$$

Faktor κ ovisan je o omjeru X/R , a određuje se prema izrazu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-\frac{3}{X/R}} \quad (8)$$

Za određivanje rasklopne struje kratkog spoja (engl. breaking current) I_b potrebno je, osim omjera X/R , poznavati i vrijeme potrebno za otvaranje kontakata prekidača, te omjer između udjela u struji kratkog spoja svakog generatora i njegove nazivne struje. Svi navedeni utjecaji definirani su faktorom μ , a rasklopna struja kratkog spoja određena je izrazom:

$$I_b = \mu I_k'' \quad (9)$$

Faktor μ se definira za različita minimalna vremena otvaranja prekidača prema izrazima:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26 e^{-0,26 I_{kG}'' / I_{nG}} , & \text{za } t_{\min} &= 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51 e^{-0,30 I_{kG}'' / I_{nG}} , & \text{za } t_{\min} &= 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72 e^{-0,32 I_{kG}'' / I_{nG}} , & \text{za } t_{\min} &= 0,10 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94 e^{-0,38 I_{kG}'' / I_{nG}} , & \text{za } t_{\min} &\geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (10)$$

pri čemu je: I_{kG}'' - udio struje pojedinog generatora u ukupnoj struji kratkog spoja,
 I_{nG} - nazivna struja generatora.

Ovako izračunata rasklopna struja ne uzima u obzir utjecaj istosmjerne komponente struje kratkog spoja, pa stoga I_b predstavlja samo simetričnu komponentu rasklopne struje. U izlaznim rezultatima proračuna trolnog kratkog spoja ta je struja označena kao I_{bsym} . Utjecaj istosmjerne komponente određuje se prema izrazu:

$$I_{DC} = \sqrt{2} I_k'' e^{\frac{2\pi f t}{X/R}} \quad (11)$$

pri čemu je: f – frekvencija (Hz),
 t – vrijeme otvaranja kontakata prekidača (s).

Na temelju izraza za simetričnu i istosmjernu komponentu može se odrediti efektivna vrijednost ukupne rasklopne struje kratkog spoja prema izrazu:

$$I_{basym} = \sqrt{I_{bsym}^2 + I_{DC}^2} \quad (12)$$

Trajna struja kratkog spoja (engl. steady-state current) određena je na temelju udjela pojedinih generatora prema izrazu:

$$I_k = \lambda I_{nG} \quad (13)$$

pri čemu je faktor λ ovisan o omjeru I_{kG}'' / I_{nG} i sinkronoj reaktanciji generatora (x_d). Ovaj se faktor posebno zadaje za turbogeneratore i generatore s istaknutim polovima.

3.2. Rezultati proračuna struja kratkog spoja

Za selektivno podešenje zaštitnih uređaja provedeni su proračuni struja kratkog spoja za maksimalna i minimalna pogonska stanja. Pritom je za pogonsko stanje koje određuje maksimalnu struju kratkog spoja u svakoj cementari pretpostavljeno da su istovremeno u pogonu svi VN motori. Maksimalne struje kratkog spoja relevantne su za provjeru dimenzioniranja rasklopne opreme. Pored navedenih pogonskih stanja određenih za proračun maksimalne struje kratkog spoja, u suradnji sa stručnjacima cementare, a u skladu s tehnološkim procesom definirana su i ostala moguća pogonska stanja. Na taj način su dobivene i minimalne struje kratkog spoja važne za selektivno podešenje zaštitnih uređaja. U svim analiziranim slučajevima proračuni su provedeni za trolini, jednolini, dvolini i dvolini kratki spoj sa zemljom, pri čemu treba napomenuti da je jednolini struja kratkog spoja u 35 kV dijelu postrojenja ograničena otpornikom za uzemljenje u TS Kaštela 110/35 kV, odnosno TS Meterize 110/35 kV na vrijednost 300 A, a u 6 kV, odnosno 3 kV postrojenju nema jednolinog kratkog spoja, jer su te mreže izolirane.

S obzirom da su cementare međusobno povezane (preko kabela 35 kV i TS Meterize) prilikom utvrđivanja maksimalnih struja kratkog spoja analizirano je više uklopnih stanja i zaključeno je sljedeće:

- a) maksimalne struje kratkog spoja u cementari "Sv. Juraj" i "Sv. Kajo" dobivaju se u slučaju kada su te dvije cementare povezane 35 kV kabelom, a cementara "Sv. Juraj" napaja se preko dva transformatora 110/35 kV u TS Kaštela,
- b) maksimalne struje kratkog spoja u cementari "10. kolovoz" dobivaju se u slučaju kada se, uz nju, iz TS Meterize 110/35 kV napaja i cementara "Sv. Kajo".

U suradnji sa stručnjacima iz "Dalmacijacementa" utvrđeno je više pogonskih stanja koja se realno mogu pojaviti u pogonu, te se na temelju njih mogu utvrditi minimalne struje kratkog spoja.

Vrijednosti dobivene proračunom struja kratkog spoja će biti prikazane naknadno, u dijelu s preporukama za podešenje relejne zaštite.

4. PODEŠENJE SUSTAVA RELEJNE ZAŠTITE

Glavna je zadaća sustava relejne zaštite ograničenje poremećaja po opsegu i po vremenu na najmanju moguću mjeru. Iz navedenog slijedi da zaštita treba djelovati brzo i selektivno, tj. potrebno je da selektivno isključi samo kvarom zahvaćeni dio mreže, a isključenje mora biti u što je moguće kraćem vremenu, tj. zahtijeva se brzo otkrivanje kvara, djelovanje releja i pripadnog prekidača.

Svrha izvedenih proračuna kratkog spoja u predmetnom sustavu je postizanje selektivnosti relejne zaštite. Pod selektivnošću se podrazumijeva automatsko isključivanje samo dijela elektroenergetskog sustava u kvaru, tj. odvajanje najmanjeg mogućeg dijela elemenata mreže oko mjesta kvara od ostatka elektroenergetskog sustava. Zbog mogućnosti zakazivanja dijela sustava relejne zaštite u praksi se uvodi rezerva u zaštitni sustav što objašnjava pojam "najmanjeg mogućeg dijela elemenata mreže oko mjesta kvara". Podjednako je štetno za sustav neselektivno isključivanje voda ili postrojenja koje nije zahvaćeno kvarom kao i neisključivanje postrojenja u kvaru.

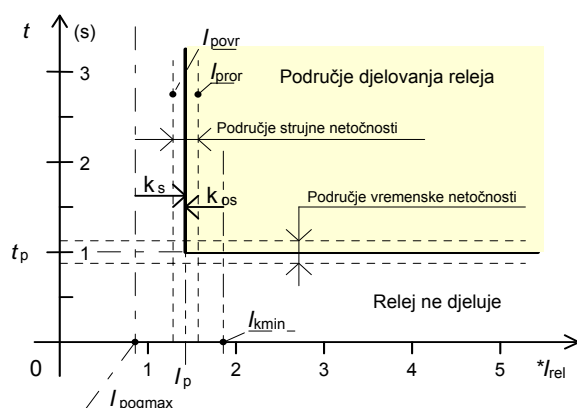
Za ostvarenje selektivnosti korišteno je vremensko stupnjevanje. Relej najbliži mjestu kvara prorađuje prvi, a svi ostali releji od mjesta kvara prema izvoru napajanja slijedom sporije. Uvriježeno je postaviti jednake (Δt , konačne) međusobne vremenske odgode prorade releja u nizu za nadstrujne ($I >$) i zemljospojne ($I_0 >$) zaštite.

4.1. Općenito o podešenju sustava relejna zaštite

Da bi se podesio nadstrujni relej potrebno je pronaći strujno područje unutar kojeg će se odabrati podešenje. Za određivanje područja podešenja, osim poznavanja minimalne struje kratkog spoja (I_{kMIN}), dobivene proračunom kratkog spoja, potrebno je poznavati i najveću struju u normalnom pogonu (I_{pogMAX}), koja se može odrediti proračunom tokova snaga. Maksimalna struja u normalnom pogonu postrojenja je ona struja koja se pojavi u normalnom režimu rada bez pojave poremećaja u sustavu.

Prilikom izbora područja podešenja valja izbjegavati približavanje podešenja bilo kojoj granici (donjoj - I_{pogMAX} ili gornjoj - I_{kMIN}). Nadstrujni relej mora biti tako podešen da ne prekida struju koja je manja od I_{pogMAX} , odnosno da reagira pri pojavi struje veće od I_{kMIN} . Na ovaj način osigurava se da ne dođe do neželjenog neselektivnog djelovanja releja.

Na slici 1. prikazana je radna karakteristika vremenski neovisnog nadstrujnog releja za višepolne kvarove. Ovaj tip nadstrujne karakteristike najčešće se susreće u elektroenergetskim mrežama HEP-a.



Slika 1. Radna karakteristika vremenski neovisnog nadstrujnog releja za višepolne kvarove

Na slici su označene pojedine vremenske i strujne zone. Ako se karakteristika postavi previše blizu I_{pogMAX} ili I_{kMIN} kaže se da se relej nalazi u "području nesigurnosti". Ako se karakteristika odmakne od I_{pogMAX} i I_{kMIN} kaže se da se relej nalazi u "području osjetljivosti". Također je označeno i područje strujne netočnosti koje je posljedica postojanja histereze releja. Histereza je određena strujom prorade I_{pror} (minimalna vrijednost struje kod koje relej djeluje) i strujom otpuštanja I_{povr} (maksimalna vrijednost struje pri kojoj relej ne djeluje). Kod kvalitetnih releja je povratni faktor (koeficijent otpuštanja) $k_{pov} = I_{povr} / I_{pror} \approx 1$. Navedeno se može prikazati sljedećim izrazima:

$$\text{Uvjet sigurnosti:} \quad I_p \geq k_s \times I_{pogMAX} \quad (14)$$

$$\text{Uvjet osjetljivosti:} \quad I_p \leq \frac{I_{kMIN}}{k_{os}} \quad (15)$$

gdje su k_s – koeficijent sigurnosti i

k_{os} – koeficijent osjetljivosti.

Iz izraza (14) i (15) može se dobiti opći izraz za struju podešenja:

$$k_s \times I_{pogMAX} \leq I_p \leq \frac{I_{kMIN}}{k_{os}} \quad (16)$$

Dobrota nadstrujnih releja definirana je povratnim faktorom (k_{pov}). Ukoliko se struja podešenja I_p kao proradna struja izrazi s I_{kMIN} ili I_{pogMAX} , izraz za I_p glasi:

$$\frac{k_s \times I_{pogMAX}}{k_{pov}} \leq I_p \leq \frac{I_{kMIN}}{k_{os} \times k_{pov}} \quad (17)$$

Da bi izabrali I_p za konkretan primjer i na taj način podesili nadstrujnu zaštitu ostaje dakle odrediti k_s , k_{os} te k_{pov} . Izbor koeficijenta sigurnosti i osjetljivosti vrši se na temelju iskustva iz prakse i obično se uzima $k_s=1,4$ i $k_{os}=1,2$. Prilikom pristupanja proračunu podešenja potrebno je poznavati omjere struje prorade i otpuštanja da bi se moglo u proračun ući s konkretnom vrijednosti k_{pov} . U slučaju da omjeri struja nisu poznati uzima se $k_{pov}=1$.

Važno je naglasiti da u jednom dijelu elektroenergetskog sustava nije moguće na uzastopnim zaštitnim uređajima primjenjivati različite radne karakteristike, jer bi neminovno došlo do njihovog preklapanja, tj. neselektivnog djelovanja pojedinih zaštita. U tvornici „Dalmacijacement“ se, prema tome, predviđa korištenje vremenski neovisnih radnih karakteristika.

4.2. Preporuke za podešenje sustava relejne zaštite u kompleksu „Dalmacijacement“

Za podešenje nadstrujne zaštite korištena je vremenski neovisna radna karakteristika releja, pri čemu se ostvarena vremenska selektivnost zaštite u elektroenergetskom sustavu tvornice „Dalmacijacement“. Najvažniji razlog za takvu odluku uvjetovan je izvedbom postojećih releja u susjednim transformatorskim stanicama koja omogućava samo primjenu vremenski neovisne radne karakteristike. Uz primijenjeni selektivni vremenski razmak $\Delta t=0,3$ do $0,5$ s može se postići relativno brzo isključenje, odnosno izoliranje mjesta kvara i na 35 kV-noj razini.

Potrebno je također istaknuti da je brza nadstrujna zaštita u velikom broju slučajeva blokirana, upravo zbog nemogućnosti pravilnog podešenja s ciljem ostvarenja osjetljivosti i selektivnosti djelovanja.

Uz odabrani koeficijent osjetljivosti $k_{os}=1,2$ te u skladu s rezultatima proračuna kratkog spoja, izračunavaju se maksimalna podešenja nadstrujnih releja:

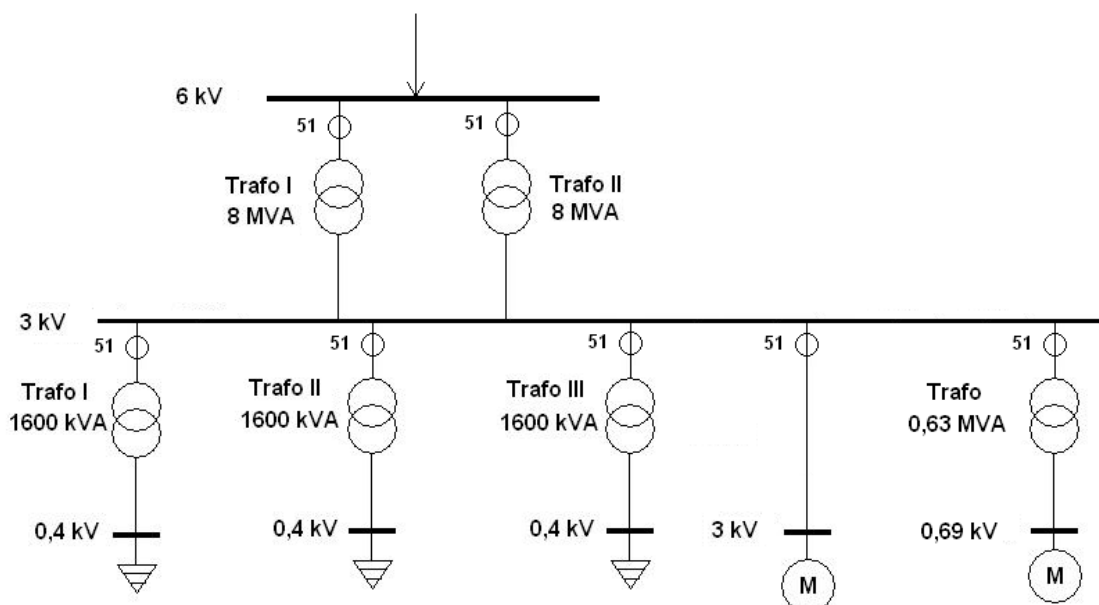
$$I_{p,M} \leq \frac{I_{kMIN}}{k_{os}} \quad (18)$$

Uz odabrani koeficijent sigurnosti $k_s=1,4$ te u skladu s rezultatima proračuna tokova snaga, izračunavaju se minimalna podešenja nadstrujnih releja:

$$I_{p,m} \geq k_s \times I_{pogMAX} \quad (19)$$

Temeljem dobivenih vrijednosti za maksimalne pogonske struje (I_{pogMAX}) i minimalne struje kratkog spoja (I_{kMIN}) te korištenjem izraza za struju podešenja releja, uzimajući u obzir koeficijente osjetljivosti (k_{os}) i sigurnosti (k_s), dobivene su granične vrijednosti ($I_{p,m}$ i $I_{p,M}$) unutar kojih je potrebno podesiti struju podešenja nadstrujnih releja.

Zbog opsega dobivenih rezultata, ovdje će biti dan samo jedan primjer, dok su ostali rezultati zabilježeni u istom formatu. Slika 2 i Tablica I. prikazuju primjer preporuke podešenja releja uzimajući u obzir rezultate dobivene proračunom tokova snaga i struja kratkog spoja te prethodno navedene izraze za određivanje minimalne i maksimalne granice podešenja nadstrujnih releja.



Slika 2. Detalj elektroenergetske mreže u tvornici „10. kolovoz“

Tablica I. Podešenja nadstrujnih releja u GTS 3 kV u (A) u tvornici „10. kolovoz“

Polje	Un (kV)	Ćelija br.	SMT	$I_{p,m}$ (A)	$I_{p,M}$ (A)	$I_{k,min}$ (A)	$I_p >$ (A)	$t_p >$ (s)
Trafo I 8 MVA	3	5	2000/5/5	3,5	38	45	5	1,5
Trafo II 8 MVA	3	9	2000/5/5	3,5	38	45,2	5	1,5
Trafo I 1600 kVA	3	2	400/5/5	1,7	54	64,3	4,5	0,5
Trafo II 1600 kVA	3	4	400/5/5	1,7	52	62,9	4,5	0,5
Trafo III 1600 kVA	3	3	400/5/5	1,7	50	59,9	4,5	0,5
Mlinica cementa kabel	3	7	600/5/5	3,6	119	142,7	5	0,5
Trafo 0,63 MVA	3	6	150/5/5	4,5	66	79,7	5	0,5

Pri čemu je:

- Polje – ime polja u elektroenergetskoj mreži,
- U_n – nazivni napon sabirnica na koje je spojeno polje,
- Ćelija br. – redni broj ćelije (polja),
- SMT – prijenosni omjer strujnog mjernog transformatora,
- $I_{p,m}$ – donja granica podešenja,
- $I_{p,M}$ – gonja granica podešenja,
- $I_{k,min}$ – minimalna struja kratkog spoja,
- $I_p >$ – preporučeno strujno podešenje releja,
- $t_p >$ – preporučeno vremensko podešenje releja.

U danom primjeru vidljiva preporučena strujna i vremenska podešenja nadstrujnih releja. Vidljivo je da su strujna podešenja releja odabrana unutar donje i gornje granice dobivene proračunom tokova snaga, odnosno struja kratkog spoja. Vremenski članovi su podešeni kako bi se postigla željena selektivnost. Vrijeme djelovanja nadstrujnih releja je odabrano ovisno o udaljenosti releja od izvora napajanja (najudaljeniji relej ima najmanje vrijeme djelovanja), uz vremensko stupnjevanje s intervalom $\Delta t=0,5$ s.

Posebno je zanimljiva provedena analiza rada EES-a u tvornici „Sv. Kajo“ s uklopljenim spojnim poljem dvostrukih sabirnica na naponskoj razini 6 kV. U tom slučaju je višestruko povećana struja kratkog spoja, čime se dovodi u opasnost cjelokupno elektroenergetsko postrojenje, zbog nemogućnosti pojedinih prekidača da isključe struju kratkog spoja, obzirom na svoju prekidnu moć, a prema mogućoj maksimalnoj struji kratkog spoja koju bi trebali prekinuti.

5. ZAKLJUČAK

Uslijed kvarova, poremećaja i smetnji u EES-u nužno je selektivno isključiti samo kvarom zahvaćeni dio mreže u najmanjem mogućem vremenu. Sustavi relejne zaštite imaju zadaću otkriti i dojaviti nastanak poremećaja, te brzo i selektivno izolirati mjesto pogođeno kvarom, od preostalog zdravog dijela EES-a.

Pravilnim podešavanjem zaštite omogućuje se ispravan rad releja i željena funkcionalnost. U teoretskom dijelu rada opisane su karakteristične vrijednosti i njihovo značenje te postupak određivanja donje i gornje granice podešenja nadstrujnih releja.

U primjeru podešenja zaštite kompleksa tvornica „Dalmacijacement“ prikazani su rezultati proračuna tokova snaga i struja kratkog spoja (prema međunarodnom standardu IEC 909/1988), dobiveni modeliranjem dane mreže u odgovarajućem programskom paketu, neophodni za selektivno podešenje relejne zaštite. Rezultati su zatim korišteni za određivanje granica unutar kojih se nalazi preporučeno podešenje releja. Podaci o kabelima, nadzemnim vodovima i transformatorima dobiveni su od strane djelatnika „Dalmacijacement“. Proračuni tokova snaga provedeni su za prosječna opterećenja na temelju iskustva djelatnika „Dalmacijacement“. Pored proračuna pogonskih struja za normalno uklopno stanje, provedeni su i proračuni za slučaj izvanrednih pogona.

Provjera podešenja nadstrujnih releja provedena je na temelju pretpostavljenih najvećih struja u normalnom pogonu i minimalnih struja kratkog spoja. Prijedlog podešenja pretpostavlja vremensko stupnjevanje s intervalom $\Delta t=0,5$ s.

LITERATURA

- [1] D. Nevečerel: "Proračun kratkog spoja u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine" , Institut za elektroprivredu i energetiku, ožujak 1999.
- [2] "Končar – Tehnički priručnik", Peto izdanje, Zagreb, 1991.
- [3] "ELKA – energetski sredjenaponski kabeli za napone do 36 kV", Katalog energetskih kabela, Zagreb 2004.
- [4] J.Arrillaga, C.P:Arnold: "Computer Analysis of Power Systems", John Wiley & Sons, 1995.
- [5] IEC 909, International Standard "Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems", Publication 1988.
- [6] Ispitni protokoli zaštitnih uređaja kompleksa tvornica „Dalmacijacement“