

Josip Popović

josip.popovic.bj@gmail.com

Zvonimir Popović

HEP – ODS d.o.o., Elektra Bjelovar
zvonimir.popovic@hep.hr

Dejan Čulibrk

HEP – ODS d.o.o., Elektra Bjelovar
dejan.culibrk@hep.hr

Mirjana Padovan

Državni inspektorat Republike Hrvatske
Mirjana.padovan@dirh.hr

PRISTUP SELEKTIVNOSTI U ZAŠTITI NISKONAPONSKE MREŽE

SAŽETAK

U radu je prikazan jedan pristup selektivnosti u niskonaponskoj mreži šticenoj od struja kratkog spoja osiguračima.

Kad su osigurači postavljeni serijski među njima zbog ispravnog djelovanja mora biti ispunjena selektivnost koja se određuje, iskustveno prema njihovim nazivnim strujama, grafički na njihovim zaštitnim karakteristikama ili proračunom prema struji kratkog spoja. Kod proračuna selektivnosti nadstrujne se karakteristike osigurača prikazu matematički aproksimativno i uz zadovoljavajuće odstupanje. Osigurač koji je niže postavljen i bliži je mjestu kratkog spoja mora djelovati na tu struju brže nego njemu više postavljeni osigurač i udaljeniji od mjesta kratkog spoja.

Za ispunjenje uvjeta selektivnosti treba vrijeme djelovanja više postavljenog osigurača biti tri puta duže od onog niže postavljenog.

Ključne riječi: niskonaponska mreža, osigurači, selektivnost zaštite

APPROACH TO SELECTIVITY AT LOW-VOLTAGE NETWORK PROTECTION

SUMMARY

This paper presents one approach to selectivity at low-voltage network protected by fuses against short-circuit currents.

Proper selectivity is required for proper operation of fuses installed in series. Selectivity is determined either by their rated currents experientially, graphically by their protective characteristics or by calculation according to the short-circuit current. In the selectivity calculation, the overcurrent fuse characteristics are mathematically approximated. A fuse closer to the short circuit location must trip on that current faster than the fuse positioned further from the short circuit location.

In order to fulfill the conditions of selectivity, tripping time of fuse positioned further should be three times longer than that of a fuse closer to the short circuit location.

Key words: low-voltage network, fuses, protection selectivity

1. UVOD

U praksi su često osigurači postavljenu nizu jedan iza drugoga. Osigurači tada moraju biti odabrani prema uvjetima selektivnosti. Strujni krug treba prekinuti zaštitni uređaj najbliži mjestu kvara tako da najmanji dio postrojenja pa tako i potrošača ostaje bez električne energije. Pošto je vrlo neprecizno koristiti se zaštitnim karakteristikama pri određivanju selektivnog djelovanja mogu se sa sigurnošću uzeti preporuke proizvođača. Pošto je poznata samo nazivna struja osigurača, polazeći od procesa u osiguračima koje uzrokuje protjecanje struje, određuje se ovisnost nazivnih struja o konstrukcijskim karakteristikama i njihov međusobni odnos da bi selektivno djelovali. Provjera sigurnog selektivnog djelovanja može se provesti ako se poznaju složeni analitički oblici zaštitnih karakteristika, pa se određuje koja su područje struja u kojima će osigurači susjednih nazivnih struja biti selektivni.

2. ZAGRIJAVANJE STRUJOM KRATKOG SPOJA

Struja kratkog spoja u niskonaponskoj mreži ima oblik:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_k) - I_m \sin \psi_k e^{-\frac{t}{T}} \quad (1)$$

Kod protjecanja struje kratkog spoja razvija se toplina i zagrijavaju se dijelovi postrojenja kroz koje ta struja protječe. Za zagrijavanje je mjerodavna efektivna vrijednost struje kratkog spoja. Pošto struja kratkog spoja uglavnom nije sinusoidalnog oblika sa stalnom amplitudom za zagrijavanje je bitan i period kroz koji ta struja protječe.

Za ocjenu mogućnosti prekidanja struje kratkog spoja i ograničenje struje kratkog spoja treba znati energiju razvijenu protjecanjem struje kratkog spoja.

U ovom slučaju vrijeme od nastanka kratkog spoja do pojave luka zavisi od struje i odnosi se na osigurače.

$$\int_0^{t_p} i^2 dt = const \quad (2)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_k) - I_m \sin \psi_k e^{-\frac{t}{T}} \quad (3)$$

Da bi se dobilo rezultat koji će predstavljati oslobođenu toplinu treba gornju jednadžbu najprije kvadrirati i onda integrirati. Radi jednostavnosti uvedu se zamjene:

$$\omega t = u \Rightarrow \omega dt = du \quad (4)$$

$$\psi_k = u_0 \quad (5)$$

$$b = \omega T \quad (6)$$

$$i = I_m \sin(u + u_0) + \sin u_0 e^{-bu} \quad (7)$$

Nakon uvrštavanja dobivaju se tablični integrali.

$$\begin{aligned} \int_0^t i^2 dt &= \frac{I_m^2}{\omega} \left[\int_0^u \sin^2 u \cos^2 u_0 du + \int_0^u 2 \sin u \cos u_0 \cos u \sin u_0 du + \right. \\ &+ \int_0^u \cos^2 u \sin^2 u_0 du - \int_0^u 2 \sin u \cos u_0 \sin u_0 e^{-bu} du - \\ &\left. - \int_0^u 2 \cos u \sin^2 u_0 e^{-bu} du + \int_0^u \sin^2 u_0 e^{-2bu} du \right] \quad (8) \end{aligned}$$

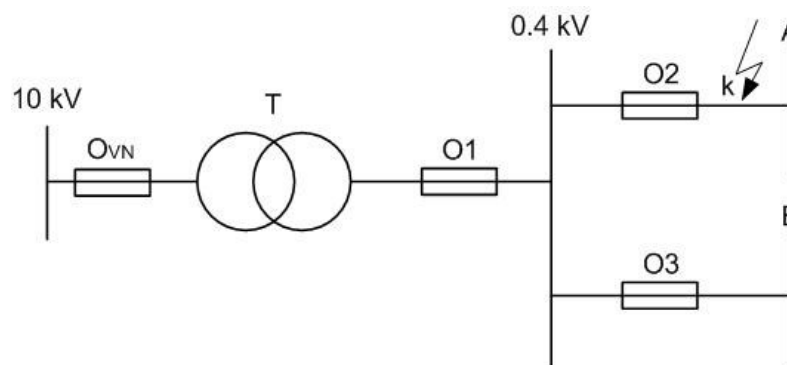
Pa je rješenje

$$\int_0^t i^2 dt = \frac{I_m^2}{\omega} \left\{ \frac{1}{2} u - \frac{1}{4} \sin 2u \cos 2u_0 + \sin u_0 \cos u_0 \sin^2 u - \right. \\ \left. - \frac{2 \sin u_0}{1+b^2} [b \sin u_0 + \cos u_0 - b e^{-bu} \sin(u-u_0)] - \right. \\ \left. - e^{-bu} \cos(u-u_0) \right\} + \frac{\sin^2 u_0}{2b} (1 - e^{-2bu}) \quad (9)$$

Ovo rješenje vrijedi za sve uvjete nastanka kratkog spoja, u simetričnim uvjetima ($\psi_k = 0$) i nesimetričnim ($\psi_k \neq 0$) gdje na oblik početne vrijednosti struje kratkog spoja ima utjecaj istosmjerna komponenta.

3. UVJET SELEKTIVNOSTI OSIGURAČA

Važno mjesto u izboru osigurača zauzima zadovoljenje uvjeta selektivnosti, tako da uvijek pregori osigurač bliže mjestu kvara i omogući ostalim potrošačima nesmetanu opskrbu električnom energijom. Ako je u nizu postavljeno nekoliko osigurača, uvjet da pregori onaj bliže mjestu kvara, bit će ispunjen ako je zaštitna karakteristika toga osigurača niže postavljena od zaštitne karakteristike osigurača koji je dalje od mjesta kvara.



Slika 1. Primjer zaštite niskonaponskih izlaza osiguračima

Selektivno djelovanje osigurača prema slici 1. podrazumijeva da će u slučaju kratkog spoja na mjestu (K) osigurač (O₂) prekinuti napajanje mjesta kratkog spoja prije nego struja kratkog spoja zagrije topivi uložak osigurača (O₁) na temperaturu taljenja.

3.1 Selektivnost susjednih osigurača

Provjera selektivnosti ugrađenih osigurača u niskonaponskim razdjelima i mrežama u praksi se provodi odabiranjem osigurača s nazivnim strujama koje se razlikuju za dva stupnja što zapravo znači da se odabiru osigurači koji nemaju susjedne vrijednosti nazivne struje.

Procesi prekidanja struje u osiguraču vrlo su složeni i teško bi ih bilo izravno izračunati.

Osim nazivnih struja za osigurače dostupne su i njihove zaštitne karakteristike. Međutim zaštitne karakteristike su neprikladne za proračune jer su prikazane grafički u logaritamskom mjerilu kao zavisnost vremena prorade od struje preopterećenja u odnosu na nazivnu struju. Ipak postoje načini da se zaštitne karakteristike prikažu analitički dovoljno točno da se može primjenjivati u proračunima.

Prema zadanim kriterijima za sigurno selektivno djelovanje osigurača može se usporedbom vremena djelovanja osigurača sa susjednim nazivnim strujama provjeriti u kojem području i osigurači sa susjednim nazivnim strujama ipak selektivno djeluju.

Vrijeme isključivanja topljivim osiguračem može biti prikazano kao ukupno vrijeme koje proteče od trenutka nastanka kratkog spoja do konačnog gašenja električnog luka:

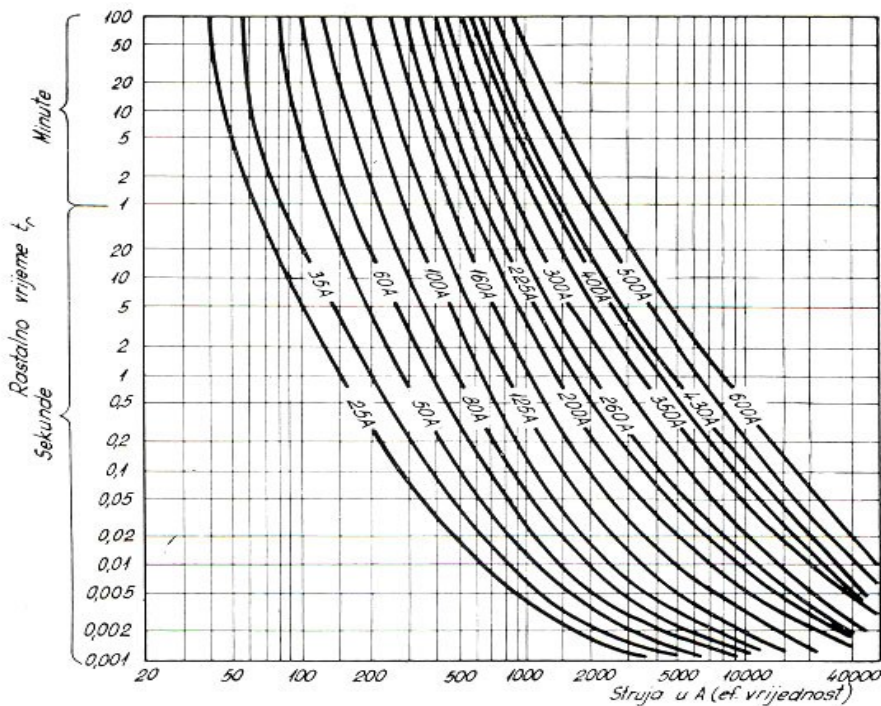
$$t = t' + t'' + t''' \quad (10)$$

$$t = (A' + A'') \frac{q^2}{i^2} + t''' = (A' + A'') \frac{q^2}{i^2} f \quad (11)$$

- A' koeficijent zagrijavanja rastalnice
- A'' koeficijent taljenja rastalnice
- f faktor gašenja električnog luka u osiguraču

Ukupno vrijeme trajanja prekidanja strujnog kruga dijeli se na vrijeme potrebno da se rastalnica osigurača zagrije strujom kratkog spoja na temperaturu taljenja, na vrijeme potrebno da metal prijeđe iz krutog u tekuće stanje i na vrijeme dodatnog zagrijavanja kada se gasi električni luk i prekida strujni krug, a ovisi o konstrukciji osigurača i induktivitetu kratkospojnog strujnog kruga, a prikazuje se faktorom koji prva dva vremena uvećava 1,7 do 2 puta. Može se smatrati da će selektivnost između dva osigurača biti ispunjena ako je ispunjen uvjet:

$$t'_{o1} \geq t_{o2} \quad (12)$$



Slika 2. Zaštitne karakteristike osigurača NVO

Pošto je kod odabira osigurača osim njegove nazivne struje dostupna i zaštitna karakteristika, koja je za osigurač određene nazivne struje zapravo neki srednji odnos struje kroz osigurač i vremena prorade, odstupanja su moguća. Uz pretpostavku da će u najnepovoljnijem slučaju vrijeme prorade biti za višepostavljeni osigurač 50% kraće od vremena na zaštitnoj karakteristici, a za nižepostavljeni osigurač 50% duže nego na zaštitnoj karakteristici, može se odrediti odnos proradnih vremena:

$$0,5t_{o1} \geq 1,5t_{o2} \quad (13)$$

$$t_{o1} \geq 3t_{o2} \quad (14)$$

Ovaj uvjet pokazuje da vrijeme prorade višepostavljenog osigurača mora biti bar tri puta veće od vremena prorade nižepostavljenog. Zaštitna karakteristika predstavlja ovisnost vremena taljenja obzirom na struju. Oblik joj je takav da je teško i neprecizno očitavati vrijednosti na samoj karakteristici, pa ju je radi proračuna i matematičkog korištenja dobro prikazati analitički u zavisnosti od struje preopterećenja uz zadovoljavajuću preciznost:

$$t = f(k) = f\left(\frac{I_p}{I_n}\right) \quad (15)$$

I_p najveća struja koju zaštitni uređaj može prekinuti [A]

Jedan analitički oblik može se prikazati [3]:

$$t = \frac{a_1}{K^2} + \frac{a_2}{K^4} + \frac{a_3}{K^6} + \frac{a_4}{K^8} + \frac{a_5}{K^{10}} \quad (16)$$

a koeficijent dopuštenog trajanja kratkog spoja

Koeficijenti $a_1 - a_5$ određuju se metodom najmanjih kvadrata i imaju posebne vrijednosti za svaku nazivnu struju osigurača, dok se faktor preopterećenja uzima kao odnos struje preopterećenja i nazivne struje osigurača tako da se za svaku nazivnu struju osigurača dobije njegovo vrijeme prorade. U tablici 1. prikazane su vrijednosti koeficijenta za jednu seriju osigurača NVO.

Ovaj uvjet pokazuje da vrijeme prorade višepostavljenog osigurača mora biti bar tri puta veće od vremena prorade nižepostavljenog. Zaštitna karakteristika predstavlja ovisnost vremena taljenja obzirom na struju. Oblik joj je takav da je teško i neprecizno očitavati vrijednosti na samoj karakteristici, pa ju je radi proračuna i matematičkog korištenja dobro prikazati analitički u zavisnosti od struje preopterećenja uz zadovoljavajuću preciznost:

Tablica 1. Vrijednosti koeficijenata $a_1 - a_5$

I_n	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
25A	2,2023	208,72	21508	-188450	793970
36A	1,9671	289,67	8060	-77526	257310
50A	1,7573	620,07	10627	-73846	304590
63A	0,853	790,54	13977	-51036	171970
80A	1,7575	258,21	68524	-301840	486310
100A	0,3941	1159,6	52316	-280130	601370
125A	0,5432	1141,5	39078	-142020	412340
160A	1,5296	1164,7	47948	-315140	756840
200A	1,6481	1366,9	69619	-331940	716920
250A	0,2814	2857,1	66421	-226040	473070
315A	1,3216	2392,3	51910	-993550	2386300
400A	0,2267	3777,1	95182	-523080	1050900

Zbog vrlo složenih procesa u osiguračima pri protjecanju različitih struja većih od njihove nazivne uspoređujući vremena djelovanja dolazi se do različitih raspona struja preopterećenja kod kojih će osigurači sa susjednim nazivnim strujama selektivno djelovati.

U tablici 2. prikazani su omjeri proradnih vremena osigurača sa susjednim vrijednostima nazivnih struja do 160 A za raspon struja do 2000 A. Ovdje je bitno da u svakoj kombinaciji osigurača postoje razlike u proradnim vremenima veće od 3 što znači da je u tom području osigurana selektivnost u djelovanju. Iz podataka u tablici 2. može se provjeriti za koja strujna područja, odnosno kod kojih struja preopterećenja će pojedina kombinacija osigurača selektivno djelovati. Izlazi da će kombinacija 36 i 25 biti selektivna do struje 400 A, kombinacija 50 i 36 do struje 100 A, kombinacija 63 i 50 do struje 500 A, kombinacija 80 i 63 do struje 700 A, kombinacija 100 i 80 do struje 1600 A, kombinacija 125 i 100 do struje 300 A, što zapravo znači da niti nema selektivnosti među njima i kombinacija 160 i 125 na cijelom strujnom području je selektivna.

Tablica 2. Odnosi u vremenima prorade osigurača do 160 A

Struja	t(36/25)	t(50/36)	t(63/50)	t(80/63)	t(100/80)	t(125/100)	t(160/125)
100	2,50	21,00	6,66	-	-	-	-
200	3,61	7,58	4,25	7,72	2,72	-	-
300	3,40	6,55	3,64	7,37	2,79	3,26	3,11
400	2,99	5,53	3,27	5,90	3,29	2,79	2,61
500	2,67	4,70	2,97	4,67	3,68	2,69	3,08
600	2,45	4,06	2,71	3,79	3,99	2,64	3,36
700	2,31	3,59	2,49	3,20	4,21	2,60	3,48
800	2,21	3,24	2,30	2,80	4,34	2,57	3,51
900	2,14	2,97	2,13	2,53	4,37	2,55	3,49
1000	2,09	2,76	1,98	2,35	4,31	2,53	3,46
1100	2,05	2,60	1,85	2,24	4,19	2,51	3,41
1200	2,02	2,47	1,74	2,18	4,02	2,49	3,37
1300	1,99	2,37	1,64	2,14	3,81	2,48	3,33
1400	1,97	2,29	1,55	2,13	3,59	2,47	3,29
1500	1,96	2,22	1,48	2,14	3,37	2,46	3,26
1600	1,95	2,16	1,41	2,16	3,15	2,45	3,24
1700	1,94	2,12	1,36	2,18	2,95	2,44	3,22
1800	1,93	2,08	1,30	2,22	2,75	2,43	3,20
1900	1,92	2,04	1,26	2,25	2,57	2,42	3,19
2000	1,91	2,01	1,22	2,29	2,41	2,42	3,18

U tablici 2. prikazani su odnosi u vremenima prorade za osigurače 160 do 400 A za struje od 1000 do 2000 A.

4. ZAKLJUČAK

Izbor osigurača za zaštitu niskonaponskih mreža predložen je kroz analizu njihovog selektivnog djelovanja na nekoliko primjera niskonaponske elektroenergetske mreže.

Kad su osigurači postavljeni u nizu, što znači, jedan do drugoga ili udaljeni jedan od drugoga, potrebno je provjeriti njihovo sigurno selektivno djelovanje. Pravilno odabrani osigurači u niskonaponskoj mreži prema pogonskim strujama i dopuštenim najvišim trajnim strujama distribucijskog transformatora i vodiča niskonaponske mreže moraju se provjeriti i da li selektivno djeluju kod struja kratkog spoja. Zato se

za svaki osigurač mora izračunati njegovo vrijeme djelovanja za struju koja kroz njega protječe. Omjer vremena djelovanja za usporedbu međusobne selektivnosti bilo koja dva osigurača mora biti veći od tri.

5. LITERATURA

- [1] Belin, B: "Uvod u teoriju električnih sklopnih aparata", Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [2] Požar, H: "Visokonaponska rasklopna postrojenja", Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [3] Guštak, D; Vidović, M: "Aproksimacija rastalne karakteristike niskonaponskih osigurača", XX savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Neum, 1991.
- [4] Pehani, A: "Iz teorije o osiguračima", Elektrotehnički vjesnik br. 3-4 1958.
- [5] Dvornik, V: "Analiza nekih mogućnosti pravilnog izbora zaštite u gradskim zamkastim mrežama", Energija br. 3-4 1969.,
- [6] Bronštejn, I. N; Semedjajev, K. A: "Matematički priručnik", Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [7] Popović, J: "Način provjere pravilnog odabira osigurača radi selektivnog djelovanja", 7. savjetovanje HO CIGRE CAVTAT, Referat B5-06, 06.-10. studenog 2005
- [8] J. Popović: "Analiza selektivnosti zaštite niskonaponske razdjelne mreže" Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2006.