

Ante Ravlić, mag. ing. el.
Ravel d.o.o.
ante.ravlic@ravel.hr

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

prof. dr. sc. Ivica Pavić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivica.pavic@fer.hr

UTJECAJ PORASTA VRIJEDNOSTI STRUJA KRATKOG SPOJA NA POVEĆANJE NAZIVNIH KARAKTERISTIKA VISOKONAPONSKE OPREME

SAŽETAK

Razvojem elektroenergetskog sustava i povezivanjem više sustava u zajednički elektroenergetski sustav, kao i sve većom izgradnjom novih izvora električne energije te njihovim povezivanjem u visokonaponski prijenosni sustav, došlo je do značajnog porasta struja kratkih spojeva, što je naročito izraženo na sabirnicama velikih čvornih transformatorskih stanica. U svijetu je toj pojavi posvećena dužna pažnja već duži niz godina, a u Republici Hrvatskoj također je došlo do značajnog porasta struja kratkog spoja te je potrebno izvršiti određene analize. Općenito se pri tome razmatraju sljedeći parametri prekidača kako bi se moglo postići optimalno tehničko-ekonomsko rješenje: nazivna trajna struja, nazivna prekidna moć, nazivna podnosiva vršna vrijednost struje kratkog spoja, vremenska konstanta i prijelazni povratni napon za kratki spoj na stezaljkama aparata.

Nazivna prekidna moć definira se s dvije vrijednosti: efektivnom vrijednošću izmjenične komponente struje kratkog spoja u trenutku razdvajanja kontakata koja se još naziva i nazivna prekidna struja i postotkom istosmjernje komponente.

Prilikom analize posebno se razmatra problematika specificiranja vremenskih konstanti za sljedeće četiri kategorije: srednjenaponske mreže nazivnih napona do 52 kV, visokonaponske mreže nazivnih napona od 72,5 kV do 420 kV, mreže vrlo visokih napona od 500 kV i višeg napona te generatorska postrojenja.

U ovom se radu detaljnije analizira problematika specificiranja vremenskih konstanti za analizu navedenih svojstava dijelova elektroenergetskog sustava, a posebno prekidača.

Ključne riječi: povećanje struja kratkog spoja, nazivne karakteristike opreme, nazivna trajna struja, vremenska konstanta, nazivna prekidna moć, nazivna podnosiva vršna vrijednost struje kratkog spoja, istosmjerna komponenta, prekidač

UPRATING OF THE SHORT CIRCUIT CURRENTS ON DEMANDING OF RATED CHARACTERISTIC OF IGH VOLTAGE EQUIPMENT

ABSTRACT

With the development of the power system and the connection of several systems in a common power system, as well as the construction of new power sources and their connection in the high voltage transmission system, there was a significant increase in short circuit current, especially on busbars of large

node transformer stations. Worldwide this phenomenon has been given due attention for many years, and in the Republic of Croatia there has also been a significant increase in the structure of short circuits, which is why it is necessary to perform certain analyses. In general, the following parameters of circuit breakers are considered in order to achieve the optimal technical and economic solution: rated continuous current, rated breaking capacity, rated withstand peak short-circuit current, time constant and transient recovery voltage at the terminals of circuit breakers.

The rated breaking power can be defined by two values: the AC component of the rated short-circuit breaking current at the time of contact separation, also called the rated breaking current and the percentage of the DC component.

During the analysis, special consideration was given to the issue of specifying time constants for the following four categories: medium voltage networks of rated voltages up to 52 kV, high voltage networks of rated voltages from 72,5 kV to 420 kV, very high voltage networks of 500 kV and higher as well as generator plants.

This paper analyses in more detail the problem of specifying time constants for the analysis of the stated properties of parts of the power system, especially circuit breakers.

Key words: uprating of short circuit current, rated characteristic of equipment, rated current, time constant, rated short circuit breaking current, rated withstand peak short circuit current, DC component of fault current, circuit breaker

1. OPĆENITO O PREKIDANJU STRUJE KRATKOG SPOJA

Kratki spojevi nastaju zbog proboja izolacije ili zbog slučajnog dodira faznih vodiča međusobno i/ili sa zemljom. Pri tome se javljaju vrlo velike struje kratkog spoja koje mogu izazvati prekomjerno zagrijavanje vodiča, povećana elektromagnetska naprezanja te moguće kvarove na prekidačima ukoliko je prekidna snaga na mjestu kvara veća od njihove nazivne vrijednosti.

Kod dimenzioniranja sklopnih aparata najveće se vrijednosti struje kvara javljaju u slučaju trolnog kratkog spoja, pa se prema toj struji računa i prekidna snaga.

Ova struja ne ovisi o načinu uzemljenja zvjezdišta mreže.

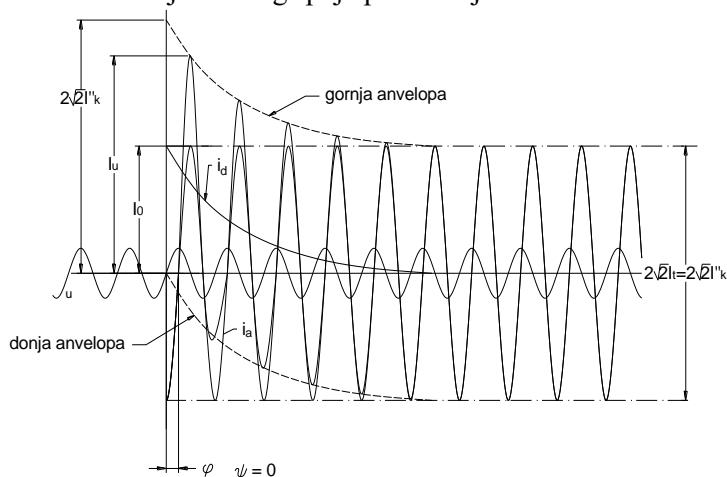
U slučaju kvarova sa zemljom koji ovise o načinu uzemljenja zvjezdišta, izvedbi i broju uzemljenih transformatora, otpora na mjestu kvara, itd., vrijednost struje kvara je vrlo kompleksna veličina.

Vrijednost struje kratkog spoja ovisi o udaljenosti mjesta kvara od generatora, a oblik struje ovisi o trenutku nastanka kratkog spoja, odnosno o magnetskom toku obuhvaćenom statorskim namotom generatora.

Ukoliko je magnetski tok obuhvaćen statorskim namotom maksimalan, struja kratkog spoja sadrži i istosmjernu i izmjeničnu komponentu struje i naziva se asimetrična struja kratkog spoja [1, 2].

Ukoliko je magnetski tok obuhvaćen statorskim namotom jednak nuli, struja kratkog spoja sadrži samo izmjeničnu komponentu i naziva se simetrična struja kratkog spoja.

Oscilogram asimetrične struje kratkog spoja prikazan je na slici 1.



Sl. 1.: Prikaz struje kratkog spoja

Vremenska ovisnost struje kratkog spoja, za pretežno induktivni strujni krug, može se prikazati izrazom:

$$i_k(t) = i_a(t) + i_d(t) \quad (1)$$

gdje je:

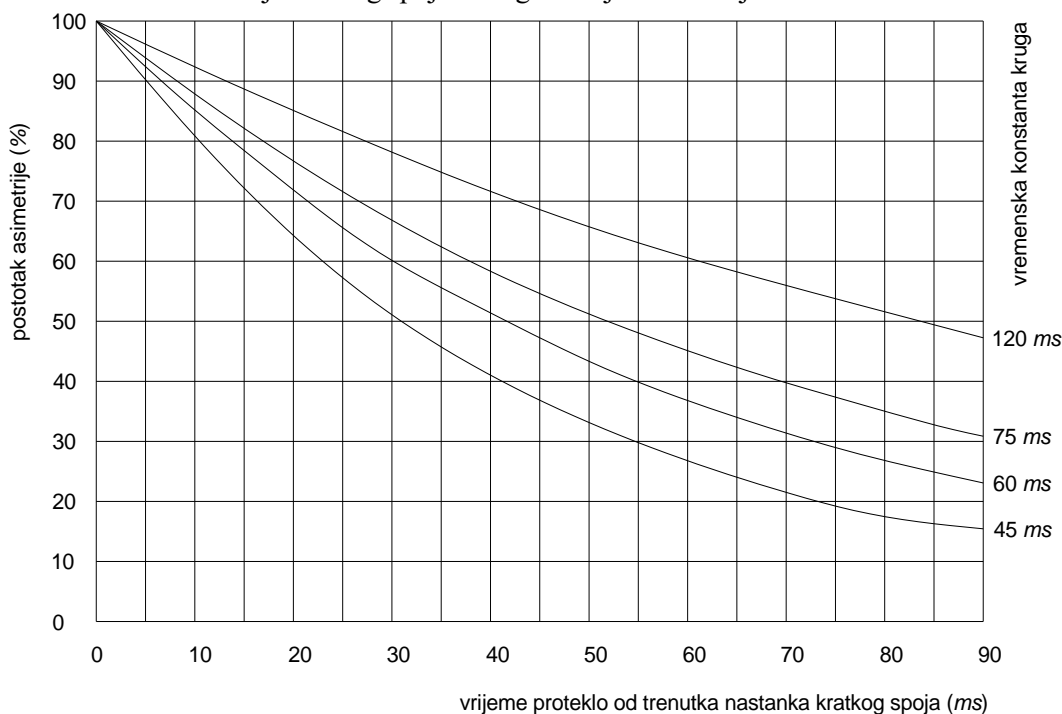
- i_a - izmjenična komponenta struje kratkog spoja (kA);
- i_d - istosmjerna komponenta struje kratkog spoja (kA);
- φ - fazni kut između napona i struje (rad);
- ψ - električni kut napona u trenutku nastanka kratkog spoja (rad).

Zbog prisustva istosmjerne komponente, struja kratkog spoja će biti asimetrična određeno vrijeme nakon nastanka kratkog spoja. Asimetrija opada s vremenom ovisno o vremenskoj konstanti kruga. Standardna vrijednost vremenske konstante prema IEC 62271-100 iznosi 45 ms [3], što dobro pokriva najveći broj realnih mreža. U slučaju kruga sa znatno većom vremenskom konstantom, tijekom ispitivanja prekidača, umjesto standardne, treba primijeniti stvarnu vrijednost vremenske konstante.

U svakom trenutku asimetrija je određena postotkom asimetrije p , koji se definira kao postotni omjer istosmjerne komponente struje (i_d) i vršne vrijednosti izmjenične (asimetrične) komponente struje (I_m):

$$p = \frac{i_d}{I_m} \cdot 100\% \quad (2)$$

Prekidači se moraju konstruirati tako da prekidaču i asimetričnu struju. Osim toga, moraju bez oštećenja izdržati povećana mehanička naprezanja čiji su uzrok elektrodinamičke sile, a koja su najveća u trenutku kada asimetrična struja kratkog spoja dostigne svoju vršnu vrijednost.



Sl. 2.: Postotak asimetrije u zavisnosti od vremena nakon nastanka kratkog spoja

Istosmjerna komponenta struje kratkog spoja iznosi:

$$i_d = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{\frac{R \cdot \omega t}{X_d'' + X_n}} \quad (3)$$

Ekvivalentna vrijednost početne simetrične struje trolejnog kratkog spoja iznosi:

$$I_k'' = \frac{U}{Z_K} \quad (4)$$

Impedancija kratkog spoja iznosi:

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} \quad (5)$$

Vremenska konstanta strujnog kruga iznosi:

$$\tau = \frac{X_K}{(\omega \cdot R_K)} \quad (6)$$

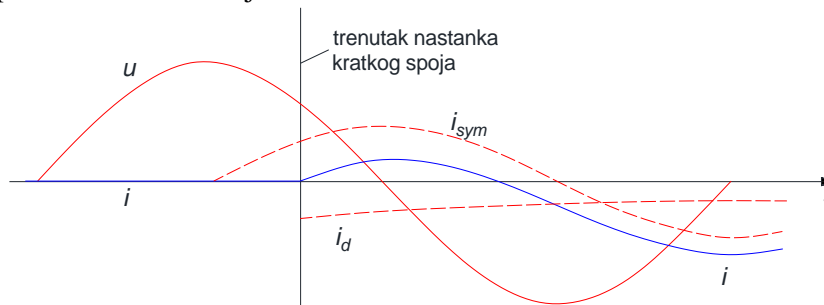
Fazni kut između napona i struje iznosi:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X_K}{R_K}\right) \quad (7)$$

Električni kut napona u trenutku nastanka kratkog spoja (rad) je ψ .

Kružna frekvencija (rad s^{-1}) je $\omega = 2\pi \cdot f$.

Na slici 3. prikazan je napon i struja u slučaju kratkog spoja. Do trenutka kratkog spoja struja je mala i na slici je prikazana nultom linijom.



Sl. 3.: Napon i struja u slučaju kratkog spoja

Poslije određenog vremena nakon kratkog spoja uspostaviti će se stacionarno stanje i u krugu će teći simetrična struja sinusoidalnog oblika i_{sym} . Fazni kut će biti gotovo 90° , s obzirom da je krug skoro čisto induktivnog karaktera.

Kako struja u induktivnom krugu ne može imati diskontinuitete u trenutku nastanka kratkog spoja, ukupna struja (i) sadrži i simetričnu (i_{sym}) i istosmjernu komponentu (i_d):

$$i = i_d + i_{sym} \quad (8)$$

Početna vrijednost istosmjerne komponente (i_d) bit će jednaka trenutnoj vrijednosti simetrične komponente u trenutku nastanka kratkog spoja (i_{sym}), ali suprotnog smjera. Zbog toga struja kratkog spoja ima početnu vrijednost 0.

Istosmjerna komponenta će opadati po eksponencijalnoj krivulji [4] i može se opisati formulom:

$$i_d = I_{DC} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

gdje su:

t - vrijeme od trenutka nastanka kratkog spoja,

τ - vremenska konstanta strujnog kruga.

Vremenska konstanta je određena gubicima u krugu ($\tau = \frac{L}{R}$) i najčešće ima vrijednosti od 30 do 50 ms u realnim mrežama, iako ponekad ima i vrijednosti i preko 130 ms.

Prema IEC 62271-100 nazivna vrijednost istosmjerne komponente struje za prekidače (izražene u postocima u odnosu na maksimalnu vrijednost simetrične struje) definirana je kao vrijednost postotka asimetrije koji odgovara vremenskom intervalu jednakom vremenu otvaranja prekidača (T_o) uvećanom za trajanje jedne poluperiode struje nazivne frekvencije (T_r), pri čemu T_r predstavlja minimalno vrijeme prorade relejne zaštite koje odgovara trajanju jedne poluperiode struje ($T_r = 10$ ms kod 50 Hz i $T_r = 8,33$ ms kod 60 Hz):

$$I_{DC} [\%] = 100 \cdot e^{-\frac{T_r + T_o}{\tau}} \quad (10)$$

Efektivna vrijednost asimetrične struje (engl. total current) određuje se na osnovu formule:

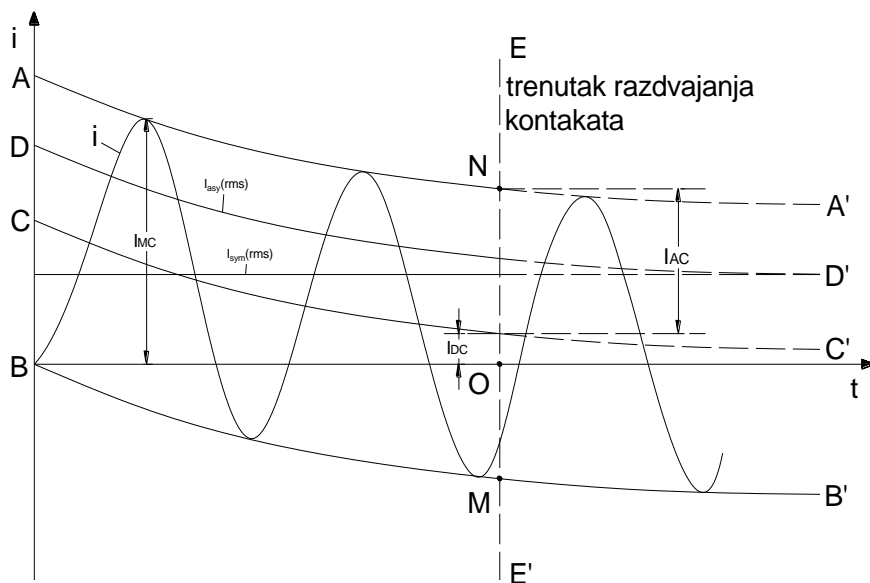
$$I_{asym} [rms] = I_{sym} \cdot \sqrt{1 + 2p^2} \quad (11)$$

Vrijednost postotka asimetrije može se odrediti na osnovu omjera istosmjerne i izmjenične komponente struje kratkog spoja kao:

$$p = \frac{I_{DC}}{I_{AC}} \cdot 100\% \quad (12)$$

$$p = 2 \cdot \frac{ON-OM}{MN} \cdot 100\% \quad (13)$$

Na slici 4 je prikazana promjena efektivne vrijednosti asimetrične struje I_{asym} u odnosu na efektivnu vrijednost simetrične struje I_{sym} .



| | |
|----------------------------|--|
| AA' | anvelopa strujnog vala |
| BB' | anvelopa strujnog vala |
| CC' | pomak nulte linije strujnog vala u bilo kojem trenutku |
| DD' | efektivna vrijednost izmjenične komponente struje |
| EE' | trenutak razdvajanja kontakata (trenutak paljenja električnog luka) |
| I_{MC} | uklopna struja |
| I_{AC} | vršna vrijednost izmjenične komponente struje u trenutku EE' |
| $I_{AC}/\sqrt{2}$ | efektivna vrijednost izmjenične komponente struje u trenutku EE' |
| I_{DC} | istosmjerna komponenta struje u trenutku EE' |
| $I_{DC}/I_{AC} \times 100$ | postotak istosmjerne komponente |

Sl. 4.: Određivanje vršne i efektivne vrijednosti asimetrične struje kratkog spoja

Tijekom prijelaznog procesa vrijednost struje mijenja se prema izrazu:

$$i = I_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos \psi - I_m \cdot \cos(\omega t - \psi) \quad (14)$$

gdje je ψ fazni kut napona u trenutku nastanka poremećaja [4].

Najveća vršna vrijednost asimetrične struje (engl. peak value) javlja se ako je kratki spoj nastao u trenutku prolaska napona kroz nulu, jer će se tada pojaviti maksimalna istosmjerna komponenta struje kratkog spoja. Vjerojatnost da se to dogodi je mala, ali se mora uzeti u obzir.

U krugu bez omskog otpora, s nazivnom frekvencijom 50 Hz i vremenskom konstantom 45 ms, asimetrična struja dostiže vršnu vrijednost 10 ms nakon nastanka kratkog spoja i ima vrijednost:

$$I_{peak} = \sqrt{2} \cdot I_{sym} \cdot \left(1 + e^{-\frac{10}{45}}\right) \quad (15)$$

$$I_{peak} = 2,55 \cdot I_{sym} \quad (16)$$

Vrijednost za 60 Hz je $I_{peak} = 2,691 \cdot I_{sym}$.

U krugu s omskim otporom vršna vrijednost će se pojaviti nešto ranije, ovisno o omjeru $\frac{R}{\omega \cdot L}$.

Na osnovu izračunatih vrijednosti, uzimajući u obzir da u realnim krugovima uvijek postoji mala vrijednost omskog otpora, IEC 62271-100 propisuje vršnu vrijednost struje kratkog spoja od $2,5 \cdot I_{sym}$ za nazivnu frekvenciju 50 Hz, a vrijednost od $2,6 \cdot I_{sym}$ za nazivnu frekvenciju 60 Hz.

Maksimalna vršna (tjemena) vrijednost struje kratkog spoja naziva se i udarna struja kratkog spoja.

Poznavanje udarne struje je potrebno da bi se odredila maksimalna naprezanja dijelova postrojenja, aparata, namota transformatora i strojeva te svih ostalih elemenata, kako bi se mogli dimenzionirati tako da izdrže maksimalna naprezanja.

Interval vremena tijekom kojeg dijelovi postrojenja (prekidač u zatvorenom položaju) mogu podnijeti struju kratkog spoja bez oštećenja je relativno kratak zbog brzog zagrijavanja vodiča i kontaktnog sustava. Količina topline koja se oslobađa raste s kvadratom struje i direktno je proporcionalna s trajanjem kratkog spoja. Zbog toga se definira maksimalno dopušteno trajanje struje kratkog spoja. Standardne vrijednosti su 1 s i 3 s.

Vrijednost vremenske konstante 45 ms specificirane u IEC normi [3] je prvenstveno određena vremenskim konstantama visokonaponskih nadzemnih vodova. Ispitivanje prekidača maksimalne vrijednosti asimetrične struje kratkog spoja je predloženo s navedenom vrijednosti vremenske konstante.

Treba naglasiti da je mala vjerojatnost istovremenog djelovanja najnepovoljnije vrijednosti asimetrične struje kratkog spoja (100%) i visoke vrijednosti vremenske konstante, te se često kombinira visoka vrijednost vremenske konstante i ograničene vrijednosti struje kvara kako bi se procijenili potrebni uvjeti za realizaciju ispitivanja koje bi bilo adekvatno realnim pogonskim uvjetima.

2. OPĆA RAZMATRANJA O OPREMI U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA

Svi elementi prijenosnih ili distribucijskih sustava opisani su prvenstveno vrijednostima otpora R i induktiviteta L . Omjer ovih veličina određuje pripadajuće istosmjerne vremenske konstante.

U sljedećoj tablici su prikazane tipične vrijednosti vremenskih konstanti dijelova elektroenergetskog sustava.

Tablica 1. Tipične vrijednosti vremenskih konstanti dijelova elektroenergetskog sustava

| | 1 MVA | 10 MVA | 100 MVA | 1000 MVA |
|-----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|
| Transformatori | 20-40 ms | 50-150 ms | 80-300 ms | 200-400 ms |
| Generatori | 60-120 ms | 200-600 ms | 200-600 ms | 300-500 ms |
| Nadzemni vodovi | < 72,5 kV < 20 ms | 72,5-420 kV 15-45 ms | 420/525 kV 35-53 ms | >525 kV 58-77 ms |

U slučaju visokonaponskih kabela, a uzimajući u obzir da oni imaju relativno velike kapacitete, očito je da će kabelski vodovi imati manje vremenske konstante od nadzemnih vodova iste naponske razine. Vremenske konstante kabela malog presjeka su jako male (blizu nule) za presjeke kabela < 200 mm² dok su za kabele nazivnog napona 220 kV ili višeg, i presjeka 2000 mm², oko 40 ms.

Induktiviteta nadzemnih vodova su oko 1 mH/km te varijacije vremenske konstante imaju uzrok u promjenama vrijednosti otpora koje su rezultat svojstava različitih materijala, dimenzija i konstrukcije vodiča i stupova.

U slučaju kvarova u elektroenergetskom sustavu vrijednosti istosmjerne vremenske konstante su određene kombinacijom vremenskih konstanti vodova koji napajaju mjesto kvara, a u praktičnim slučajevima s maksimalnom strujom kvara za koju su prekidači ispitani.

Kombinacije različitih vodova koji napajaju mjesto kvara i kompleksnih utjecaja vrijednosti X i R utječu na oblik eksponencijalnog opadanja te daju približne rezultate za realne situacije. Ukoliko je vremenska konstanta dobro odabrana, navedene pretpostavke ne bi trebale predstavljati značajne probleme prilikom izrade daljnjih analiza.

Postoje brojni trendovi u primjeni opreme, a posebno u slučaju visokih i vrlo visokih napona, koji su važni kod izrade proračuna. To uključuje:

1. Sve veća je potreba za korištenjem velikih transformatora sa smanjenim gubicima s relativno velikim vremenskim konstantama koje doprinose minimalizaciji kapitalnih gubitaka.
2. Instaliranje energetskih transformatora s visokim vrijednostima kratkospojne reaktancije pomaže kod ograničenja vrijednosti struja kratkog spoja što predstavlja dodatne troškove kod zahtjevanog proširenja područja regulacije napona sa svrhom smanjenja pada napona. Tako su npr. zabilježeni podaci o vrijednosti napona kratkog spoja energetskih transformatora u Kanadi od čak 32 %.
3. Sve veća primjena vodiča velikog presjeka, kao i primjena više vodiča u snopu, ima za posljedicu sve veće vrijednosti vremenskih konstanti za pripadajuću naponsku razinu.
4. Sve veća primjena FACTS opreme za nadzor i upravljanje naponskih prilika pri čemu treba navesti i prigušnice za smanjenje struja kratkog spoja.

Svi navedeni utjecaji kao i sve veća povezanost elektroenergetskih sustava kao i integracija malih proizvodnih jedinica u mrežu, ima za posljedicu povećanje vremenskih konstanti u slučaju pojedinih izvora napajanja kvara kao i općenitog povećanja vrijednosti vremenskih konstanti u elektroenergetskom sustavu.

Zbog toga se sada istražuju mogućnosti smanjenja vremenskih konstanti u elektroenergetskim sustavima pojedinih država u svijetu.

3. OPĆA RAZMATRANJA O ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA

Općenito se elektroenergetske mreže mogu podijeliti u više kategorija na osnovu nazivnih napona i njihove osnovne topologije.

U skladu s vrijednostima nazivnih napona, elektroenergetske mreže se mogu općenito klasificirati u sljedeće kategorije:

1. Srednjenaponske mreže nazivnih napona do 52 kV.
2. Visokonaponske mreže nazivnih napona od 72,5 kV do 420 kV.
3. Mreže vrlo visokih napona, viših od 420 kV (u praksi iznad 500 kV).

U vezi s topologijom mreža, postoje dvije osnovne kategorije:

1. Uzamčene mreže (engl. meshed networks) koje su dominantno s povezanim nadzemnim vodovima i kabelima što rezultira istosmjernim vremenskim konstantama od oko 45 ms ili manjim, i to najčešće s visokim vrijednostima struja kratkog spoja.
2. Mreže koje se uglavnom napajaju iz energetskih transformatora. U takvim slučajevima su istosmjerne vremenske konstante uglavnom određene isključivo značajkama energetskih transformatora i općenito su vremenske konstante veće od 150 ms. Tada su obično vrijednosti struja kratkog spoja relativno male.

Iz navedenih klasifikacija mogu se navesti neke opće značajke pojedinih mreža.

Srednjenaponske mreže nazivnih napona do 52 kV se vrlo često, ali ne uvijek, napajaju preko transformatora. U takvim mrežama mogu se pojaviti značajno veće vrijednosti istosmjernih vremenskih konstanti koje se trebaju razmatrati već u fazi projektiranja i ispitivanja, a posebno u slučaju kada prelaze vrijednosti 100 ms. Također treba istaknuti da su u takvim slučajevima vrlo često relativno male vrijednosti struja kratkog spoja uz vrlo visoke vrijednosti istosmjernih vremenskih konstanti.

Većina visokonaponskih mreža je u području nazivnih napona između 72,5 kV i 420 kV te su dominantno pripadajuća postrojenja koja se napajaju nadzemnim i kabelskim vodovima, a vremenske konstante do 45 ms dobro opisuju većinu navedenih postrojenja.

Treba istaknuti da u određenim konfiguracijama mreže i izvedbama vodova dolazi do vrijednosti vremenskih konstanti većih vrijednosti od oko 60 ms i to u kombinaciji s vrlo visokim vrijednostima struja kratkog spoja.

Zbog relativno malo pogonskih iskustava s mrežama nazivnih napona viših od 525 kV, nema dovoljno podataka o vremenskim konstantama za takva postrojenja. Posebnost takvih postrojenja je da su ona najčešće povezana vrlo dugim nadzemnim vodovima novijih projektnih rješenja te da sadrže transformatore vrlo velike snage, što sve rezultira visokim vrijednostima vremenskih konstanti. Tako su zabilježene vremenske konstante od 55 ms kod napona 550 kV, 75 ms kod napona 765 kV i 110 ms kod napona 1100 kV.

3.1. Razvoj prekidača visokog napona

Razvoj prekidača tijekom posljednjih 40 godina je bio značajan i kao rezultati značajno su smanjene veličine, težine i zahtjevi na potrošnju energije prekidača te cijena. Navedeni napredak je imao za posljedicu smanjenje rezervi kod osnovnih svojstava prekidača u odnosu na prekidače starijih godina proizvodnje, što je pokazalo i pogonsko iskustvo u različitim državama. Zbog daljnjih zahtjeva na osnovu karakteristika prekidača u budućnosti, a zbog sve većih zahtjeva elektroenergetskog sustava, potrebno je definirati određene parametre ispitivanja kako bi bili sigurni da će i prekidači novije proizvodnje sigurno i pouzdano raditi i u budućnosti.

Dok su se prije koristili jednotlačni SF₆ prekidači na potisnom principu (engl. single pressure puffer type SF₆ circuit breakers) koji su imali osnovni nedostatak u vezi relativno dugog hoda s velikim pogonskim silama koje su se mogle osigurati samo s pogonskim mehanizmima s velikom akumuliranom energijom i koji su bili skupi, sada se koriste sve više jednotlačni SF₆ prekidači koji koriste toplinsku energiju luka u

procesu gašenja luka [5]. Takvi prekidači su obično SF₆ prekidači sa samootpuhivanjem (engl. self blast or autopuffer SF₆ circuit breakers).

Bitna je razlika u tome što kod prekidača na potisnom principu postoji povratna veza između kompresijskog prostora i pogonskog mehanizma, koji mora imati dovoljnu energiju da nastavi gibanje i kompresiju prostora i u slučaju kada je u njemu već povišeni tlak, dok kod prekidača sa samootpuhivanjem ova veza ne postoji ili je znatno reducirana [6].

Dakle, problem se javlja kod prekidanja manjih struja kada energija luka nije dovoljna za osiguranje dovoljnog tlaka za efikasno otpuhivanje luka. Zato su razvijeni prekidači koji koriste samootpuhivanje luka s potisnim principom gašenja luka.

Ovakav princip rada omogućio je i na visokonaponskim prekidačima primjenu pouzdanih niskoenergetskih motorno opružnih pogonskih mehanizama koji su se do tada s uspjehom koristili na srednjenaponskim prekidačima [7].

Za prekidanje manjih struja dovoljan je relativno mali tlak plina u kompresijskom cilindru koji se samo za ovaj dio energije zahtijeva od pogonskog mehanizma. Kod većih struja energiju potrebnu za stvaranje tlaka dovoljnog za efikasno otpuhivanje i hlađenje luka osigurava sam luk. Dakle, kod prekidanja manjih struja (do nekoliko kA), sklopni element ovakvog tipa prekidača radi na istom principu kao klasični SF₆ prekidač na potisnom principu (puffer tip).

U odnosu na prekidače s klasičnim potisnim principom gašenja luka, ovakav tip prekidača, za postizanje iste prekidne moći, zahtijeva svega oko 30 % energije pogonskog mehanizma.

U slučaju većih struja, toplinsko djelovanje luka postaje izrazito što uzrokuje značajno povećanje tlaka u kompresijskom prostoru.

Nova programska podrška koja se danas koristi za simulaciju dinamičkog rada prekidača i za proučavanje njegove interakcije s mrežom, dovela je do toga da se bolje koristi električni luk koji se javlja pri svakom prekidanju strujnog kruga.

Skupa ispitivanja se koriste samo za provjeru i dokazivanje sklopnih svojstava prekidača, dok se izbjegavaju, zbog smanjenja troškova, tijekom istraživanja i razvoja prekidača.

U načelu, velike energije i relativni mali omjer $\frac{di}{dt}$ u vezi prekidanja asimetričnih struja su manje opasni zahtjevi za takve sklopne aparate nego za slučajeve prekidanja ekvivalentnih simetričnih struja. Manje potrebne energije i moguća produljenja vremena luka (engl. extended arcing period) te ukupna vremena gibanja su faktori koji mogu uzrokovati probleme te je stoga potrebno izvršiti detaljnija ispitivanja.

Jedno od očitih rješenja, ali koje se ne mora preferirati, je povećanje vlastitih vremena prekidača kako bi se riješio problem sklapanja asimetričnih struja sve do vrijednosti koja ne utječe na ostale karakteristike prekidača, ali može biti nezgodna u vezi nekih drugih zahtjeva elektroenergetskog sustava. Navedeno rješenje je suprotno od zahtjeva mrežnih pravila za maksimalnim smanjenjem vremena djelovanja relejne zaštite u visokonaponskim mrežama.

3.2. Stajališta korisnika

Osnovno stajalište korisnika je da se standardizira oprema i da oprema zadovolji zahtjeve u budućnosti. Treba istaknuti da je u prošlosti bilo relativno malo kvarova zbog utjecaja sklapanja asimetričnih struja. Osnovni razlog je što je tek nakon dužeg vremenskog razdoblja došlo do graničnih vrijednosti, budući da je razvoj elektroenergetskog sustava bio postupan, a često je i kasnio zbog raznih razloga.

Sve stroži zahtjevi za skraćanjem vremena isklapanja pooštravaju zahtjeve za ispitivanje te je oprema sve bliže graničnim vrijednostima, tj. s vrlo malim marginama.

Zbog toga veći broj korisnika zahtijeva izvođenje specijalnih tipskih ispitivanja koja obuhvaćaju neka ispitivanja koja prelaze granične vrijednosti definirane standardnim ispitivanjima.

Tako je npr. u Velikoj Britaniji praksa da se sklopni aparati ispituju s 63 kA s vremenskom konstantom 45 ms ili s 57,5 kA i vremenskom konstantom 60 ms. U Njemačkoj se ispituje s 63 kA i 50 ms, a na lokacijama s 80 kA u velikoj većini postrojenja ispitivanja se vrše s 45 ms dok se u vrlo malom broju postrojenja primjenjuju ispitivanja s 57 ms.

U Francuskoj se u 420 kV mreži maksimalne vrijednosti vremenskih konstanti 60 ms i 70 ms, u 245 kV mreži su vrijednosti vremenskih konstanti 160 ms [8, 9] dok su u mrežama nižih naponskih razina

200 ms. Vrijednosti vremenskih konstanti 70 ms su na lokacijama u mreži gdje su koncentrirane velike proizvodne jedinice.

U Italiji (podaci se odnose na sjeverni dio Italije) u 380 kV mreži su vremenske konstante u području 40-63 ms, pri čemu je srednja vrijednost 54 ms za struje kvara veće od 30 kA.

U Njemačkoj u 10 kV i 20 kV mrežama su vremenske konstante između 80 ms i 100 ms.

U Kanadi u 315 kV mreži su vremenske konstante u svim slučajevima veće od 45 ms, dok u 735 kV mreži vremenske konstante prelaze 77 ms. U mrežama nazivnih napona nižih od 315 kV, vremenske konstante su između 45 ms i 160 ms, te su korisnici preporučili vrijednosti vremenskih konstanti iz sljedeće serije: 45, 60, 80 i 120 ms.

U Japanu je 550 kV mreža jako uzamčena, ali je na nižim naponskim razinama često radijalno napajanje postrojenja.

Primjeri kombinacija nazivnih parametara su: 550 kV/63 kA/118 ms; 300 kV/42,8 kA/190 ms; 300 kV/31,5 kA/128 ms; 168 kV/30,5 kA/136 ms; 168 kV/30,5 kA/136 ms; 168 kV/20 kA/96 ms; 72 kV/26,3 kA /97 ms i 72 kV/12,5 kA/48 ms. Usprkos očigledno vrlo visokih vrijednosti vremenskih konstanti, nije uočen veći broj kvarova čiji bi uzrok bila nemogućnost isklapanja kvarova s visokom vrijednosti istosmjernje vremenske konstante.

U SAD korisnici su svoje zahtjeve saželi u 4 kategorije:

1. Mreža 500 kV – U većini postrojenja struje kratkog spoja su manje od 40 kA s vremenskim konstantama do 130 ms pri čemu je u većini slučajeva vremenska konstanta manja ili jednaka 80 ms.
2. Mreža 230 kV – Većina postrojenja se dimenzionira za struje kvara do 40 kA s vremenskim konstantama od oko 93 ms pri čemu je u većini slučajeva vremenska konstanta manja ili jednaka 66 ms.
3. Mreža 115 kV – Većina postrojenja se dimenzionira za struje kvara manje od 35 kA s vremenskim konstantama koje nisu velike te samo u vrlo rijetkim slučajevima dosežu vrijednosti 100 ms.
4. Mreža 69 kV i niže naponske razine – U postrojenjima su vrlo niske vrijednosti struja kvara (tipično 5 do 10 kA), ali su vrijednosti vremenskih konstanti u vrlo širokom području od vrlo malih vrijednosti do čak 240 ms.

Dakle, prema podacima korisnika nisu uočeni slučajevi s vrlo visokim vrijednostima struja kratkog spoja i visokim vrijednostima vremenskih konstanti.

U Velikoj Britaniji je procijenjeno da oko 15 % lokacija s postrojenjima nazivnih napona 275 kV i viših, realno zahtijeva više od 60 % nazivnih vrijednosti struje kratkog spoja s vremenskim konstantama većim od 45 ms. Te vrijednosti variraju zbog različitih utjecajnih faktora kao što su koncentracija proizvodnih izvora, povećanje uzamčenja mreže, primjena vodova s vodičima kao što su 2x850 mm², što sve rezultira s vremenskom konstantom od oko 53 ms.

Očita je potreba da korisnici trebaju dobro upoznati opisanu problematiku kako bi se mogle donijeti odgovarajuće odluke u vezi provedbe ispitivanja i definiranja parametara ispitivanja.

3.3. Razmatranja u vezi vjerojatnosti pojava

Povijesno gledano, značajan dio proučavanja bio je posvećen vjerojatnosti pojave asimetričnih struja kratkog spoja, i to temeljem iskustvenih podataka. Radi se o vrlo malim vjerojatnostima, uzimajući u obzir uvjet da kratki spoj nastane kada pogonski napon prolazi kroz nulu. To znači da treba razmatrati pojavu potpuno asimetričnih kratkih spojeva uslijed udara munje, prorade automatskog ponovnog uklopa na kvar ili manipulacije aparatima pod naponom spajanjem na uzemljenje. To su kratki spojevi gdje je trenutak nastanka s obzirom na veličinu trenutačnog pogonskog napona slučajna veličina.

Iako je ispravno razmatrati sve ispitne zahtjeve, to nije uvijek optimalno. Korištenjem IEC kriterija vjerojatnosti od 90% predlaže se da standardni prekidač bude u potpunosti sposoban za najnepovoljnije moguće slučajeve kratkih spojeva na 90% lokacija elektroenergetskog sustava, a ne za 90% kratkih spojeva na svakoj lokaciji. Činjenica da su potpuno asimetrični kratki spojevi rijetki nije od značaja.

Ako bi se ovakav probabilistički pristup razradio do krajnosti, zaključilo bi se da mnogo više prekidača od njih 90% u pogonu izvrši sklopne operacije zbog kratkog spoja s bitno nižim strujama kratkog spoja u odnosu na svoje nazivne parametre (činjenica je da će prekidač jako rijetko prekidati nazivnu struju

kratkog spoja za koju je deklariran). To bi značilo, prema [6] da nije uvijek potrebno ispitivati prekidače za nazivne struje kratkog spoja, već se sugerira da to nije stvarna intencija kriterija vjerojatnosti od 90%, te da bi se kriterij vjerojatnosti od 90% u ovom slučaju trebao primijeniti samo na jedan dio lokacija u elektroenergetskoj mreži.

3.4. Razmatranja isporučitelja/proizvođača

Primarna preokupacija proizvođača je neizbježna pojava promjena normi i zahtjeva u vezi ispitivanja te posljedice na projektno i konstrukcijsko rješenje opreme. Svako povećanje vremenske konstante znači povećanje, iako marginalno, specificiranih zahtjeva.

Utjecaj se može podijeliti u dva posebna slučaja:

1. posljedice na promjene sposobnosti sadašnjih proizvoda te razvoj opreme za budućnost koja će zadovoljiti specificirane zahtjeve;
2. posljedice na buduća rješenja izvedbe.

Želja je proizvođača da promjene tehničkih rješenja i dodatna ispitivanja budu minimalni.

U prvom slučaju moguća su dva različita scenarija zbog promjene specifikacija. Prvi scenarij se odnosi na mogućnost da se postojeći standardni proizvod može ponovno ispitati u skladu s dodatnim zahtjevima te tada dodatni zahtjevi u promijenjenim specifikacijama definiraju cijenu ispitivanja.

U slučaju drugog scenarija je lošija situacija jer postojeći standardni proizvod ne može zadovoljiti dodatne zahtjeve. U tom slučaju treba izvršiti dodatni razvoj kao i dodatna ispitivanja što može značajno povećati cijenu proizvoda u budućnosti.

Ponekad je u takvom slučaju povoljnije ponuditi opremu s višim nazivnim karakteristikama jer to može biti optimalnije rješenje.

Iz navedenih razloga bitno je zadovoljiti stvarne zahtjeve elektroenergetskog sustava kako bi se izbjeglo nepotrebno ispitivanje koje će, u konačnici, biti skuplje za sve sudionike u procesu ugradnje opreme.

3.5. Razmatranje ispitnih stanica

Vremenske konstante koje su na raspolaganju u visokonaponskim laboratorijima (ispitnim stanicama) u kojima se vrše kratkospojna ispitivanja jako variraju u ovisnosti o tome radi li se o laboratorijima spojenim na mrežu ili imaju vlastite generatore. To treba uzeti u obzir kod specificiranja zahtjeva za ispitivanja i kada se procjenjuje prihvatljivost izvedenih ispitivanja s visokim efektivnim vrijednostima struja koristeći manje vremenske konstante kod dokazivanja sposobnosti prekidanja manje struje s povećanom vremenskom konstantom.

Prilikom definiranja vrijednosti vremenskih konstanti bitno je razmotriti mogućnosti ispitnih stanica. Osnovno pitanje je u vezi mogućnosti ispitivanja određene struje kratkog spoja s pripadajućom vremenskom konstantom. Pri tome vremenske konstante mogu varirati u širokom rasponu od 20 ms do preko 100 ms (i više stotina ms u specijalnim slučajevima) za pojedina generatorska postrojenja. Zbog toga nije moguće točno definirati vrijednost vremenskih konstanti za ispitne stanice. U velikim ispitnim stanicama treba biti na raspolaganju niz prigušnica i kondenzatora za modificiranje vrijednosti vremenskih konstanti. U praksi male promjene u specifikaciji vremenskih konstanti (npr. s 45 ms na 60 ms kod maksimalne vrijednosti struja kratkog spoja) ne bi trebale predstavljati velike probleme za ispitne stanice. Veći problem može predstavljati ispitivanje opreme s većim vrijednostima vremenskih konstanti (preko 100 ms).

Prema raspoloživim informacijama ispitivanja s vremenskim konstantama do 60 ms su moguća u većini ispitnih stanica za široki opseg struja kratkog spoja.

Isto tako treba naglasiti da zahtjev za što manjim gubicima zbog tereta (u bakru) energetskih transformatora znači povećanje vrijednosti vremenske konstante transformatora.

Osim vremenske konstante, treba izvršiti kontrolu i drugih aspekata metode ispitivanja što se treba razmatrati tijekom izvedbe i komentara pojedinih uvjeta ispitivanja. Kada nije moguće ili je nepraktično dobiti točne karakteristike vremenskog opadanja struje, opcija je u variranju pojedinih komponenti kao što su izmjenična (AC) komponenta struje s ciljem dobijanja ispravne vršne vrijednosti, itd.

Pri tome posebna pažnja treba biti posvećena da se osigura kako prekidač ne bi bio prekomjerno napregnut prije, tijekom i nakon ispitivanja te da kritični faktori kao što je maksimalno trajanje luka budu potpuno reprezentativne vrijednosti. Zbog svega navedenog primjena izraza „ekvivalentno ispitivanje“ (engl. equivalence testing) treba se vrlo pažljivo razmotriti.

4. OSNOVNE ZNAČAJKE I PREPORUKE

4.1. Klasifikacija vremenskih konstanti

Vremenske istosmjerne konstante (engl. network d.c. time constants) mogu se općenito klasificirati u sljedeće kategorije:

- a) srednjenaponske mreže nazivnih napona do 52 kV;
- b) visokonaponske mreže nazivnih napona od 72,5 kV do 420 kV;
- c) mreže vrlo visokih napona od 525 kV do najviših napona;
- d) generatorski krugovi.

U svakoj od navedenih kategorija istosmjerne vremenske konstante također variraju u odnosu na vrijednost struje kratkog spoja.

4.2. Srednjenaponske mreže nazivnih napona do 52 kV

4.2.1. Općenito

U vezi istosmjernih vremenskih konstanti nazivnih napona do 52 kV mogu se podijeliti u dvije kategorije primjene:

- a) Prekidači koji su spojeni preko nadzemnih vodova i kabela u uzamčenim mrežama imaju istosmjerne vremenske konstante od 45 ms ili manje.
- b) Prekidači koji su spojeni na sabirnice koje su spojene na jedan ili više energetskih transformatora. U ovim slučajevima istosmjerna vremenska konstanta je određena prvenstveno energetskim transformatorima i općenito je veća od 45 ms i moguće su vrijednosti do 150 ms.

4.2.2. Preporuke

Za prekidače nazivnih napona do 52 kV vremenske konstante se mogu podijeliti u dvije klase:

1. Vremenska konstanta 45 ms je zadovoljavajuća za distribucijske mreže koje se napajaju preko zračnih vodova i kabelskih vodova.
2. Vremenska konstanta 120 ms se preporuča za prekidače u transformatorskim stanicama u kojima su struje kratkog spoja jednake nazivnim prekidnim strujama kratkog spoja prekidača. U slučaju kada su zahtjevane struje kratkog spoja manje od nazivne prekidne struje prekidača za najmanje jednu klasu iz R10 serije ispitnih vrijednosti prekidača koji su ispitani s 45 ms, mogu zadovoljiti zahtjeve. To znači da se prekidači ispitani za 50 kA s vremenskom konstantom 45 ms mogu predložiti kako bi bili adekvatni za lokacije s 40 kA s većom vremenskom konstantom.

4.3. Visokonaponske mreže nazivnih napona od 72,5 kV do 400 kV

4.3.1. Općenito

Vremenske konstante u visokonaponskim mrežama nazivnih napona od 72,5 kV do 400 kV su dominantno povezane vodovima i istraživanja pokazuju da vremenske konstante od 45 ms adekvatno pokrivaju većinu takvih slučajeva [8]. Ipak, u pojedinim slučajevima konfiguracija mreže i izvedbe vodova postoje veće vremenske konstante, i do 60 ms, i to u kombinaciji s visokim strujama kratkih spojeva. Također ponekad postoje lokacije s manjim strujama kratkih spojeva koje zahtijevaju veće vremenske istosmjerne konstante zbog značajnog udjela struje kratkog spoja koja se napaja iz energetskih transformatora.

4.3.2. Preporuke

1. Postojeće vrijednosti vremenske konstante 45 ms pokrivaju najveći dio lokacija s prekidačima nazivnih napona od 72,5 kV do 400 kV i takvi slučajevi zadovoljavaju zahtjeve na mjestu ugradnje.
2. Za mreže s većim vremenskim konstantama, do 60 ms, vremenske konstante za ispitivanje su predmet posebnih dogovora.
3. Za transformatore u visokonaponskim postrojenjima specificirana vremenska konstanta može biti povećana, ali su struje kratkog spoja kod ove primjene ograničene impedancijom transformatora na vrijednosti ispod nazivne prekidne struje kratkog spoja.
4. U slučaju kada su zahtjevi u vezi stvarne struje kratkog spoja manji od nazivne prekidne struje kratkog spoja prekidača za najmanje jednu klasu R10 serije ispitivane vremenske konstante od 45 ms, može se zaključiti da su zadovoljeni zahtjevi za veću vremensku konstantu. Tako npr. prekidači nazivne prekidne struje kratkog spoja koji su ispitani s vremenskom konstantom 45 ms, mogu se koristiti na lokacijama sa strujom kratkog spoja 40 kA s većom vremenskom konstantom.

4.4. Mreže vrlo visokih nazivnih napona (525 kV i višeg)

4.4.1. Općenito

Vremenske istosmjerne komponente u mrežama vrlo visokih nazivnih napona 525 kV i višeg nisu do kraja istražene ali se definitivno povećavaju s porastom napona i općenito su veće od 45 ms.

Tako su npr. za mreže nazivnog napona 550 kV tipične vrijednosti vremenskih konstanti 55 ms, za mreže nazivnih napona 765 kV su tipične vrijednosti 75 ms, a za mreže nazivnih napona 1100 kV vrijednosti vremenskih konstanti iznose 110 ms.

4.4.2. Preporuke

1. Vremenske konstante specificirane za ispitivanje se izračunavaju individualno za pojedine slučajeve i predmet su posebnih dogovora.
2. U slučajevima manjih struja kratkih spojeva od nazivnih vrijednosti prekidnih struja kratkih spojeva prekidača za najmanje jednu klasu iz niza R10 serije ispitanih prekidača s vremenskom konstantom 45 ms mogu u potpunosti zadovoljiti zahtjeve s većim vremenskim konstantama. Tako npr. prekidači ispitani za prekidne struje 50 kA s vremenskom konstantom 45 ms mogu se primjenjivati na lokacijama zahtjevano prekidne struje kratkog spoja 40 kA s većom vremenskom konstantom.

5. GENERATORSKI KRUGOVI

5.1. Općenito

Razmatraju se prekidači za primjenu u generatorskim krugovima s generatorima relativno manje snage (npr. 20 MVA) koji su spojeni na lokalnu distribucijsku mrežu te se koriste standardni prekidači, a ne specijalni generatorski prekidači.

Pri tome se ne razmatraju prekidači u slučajevima generatora velike snage spojenih na visokonaponsku mrežu kao i generatori male snage spojeni u industrijskim mrežama.

U takvim slučajevima su vremenske konstante u pojedinim slučajevima veće od 45 ms.

5.2. Preporuke

1. Preporuka je korištenje vremenskih konstanti od oko 100 ms.
2. U slučajevima kada su zahtjevano vrijednosti struje kratkog spoja niže od nazivne prekidne struje kratkog spoja za najmanje jednu klasu iz R10 serije iz niza ispitivanja prekidača s vremenskom konstantom 45 ms, mogu u potpunosti zadovoljiti zahtjeve na lokaciji postrojenja. Tako npr. prekidači s 50 kA ispitani s vremenskom konstantom 45 ms mogu se koristiti na lokacijama s $I_K = 40$ kA i većom vremenskom konstantom od 45 ms.

6. ZAKLJUČAK

Zbog prisustva istosmjerne komponente, struja kratkog spoja će biti asimetrična određeno vrijeme nakon nastanka kratkog spoja. Asimetrija opada s vremenom ovisno o vremenskoj konstanti kruga. Standardna vrijednost vremenske konstante prema IEC 62271-100 iznosi 45 ms, što dobro pokriva najveći broj realnih mreža. U slučaju kruga sa znatno većom vremenskom konstantom, tijekom ispitivanja prekidača, umjesto standardne vrijednosti, treba primijeniti stvarnu vrijednost vremenske konstante.

Poznavanje točne vrijednosti udarne struje je potrebno već tijekom izrade projektne dokumentacije i izrade ponudbene dokumentacije kako bi se odredila maksimalna naprežanja dijelova postrojenja kako bi se mogli dimenzionirati na ispravan način da mogu izdržati maksimalna naprežanja u slučaju kvarova.

LITERATURA

- [1] H. Požar: *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.
- [2] IEC 60909-0:2016: *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*
- [3] IEC 62271-100:2001: *High-voltage alternating-current circuit breakers*
- [4] R. Roeper.: *Short circuit Currents in Three phase Systems*, Siemens Aktiengesellschaft John Wiley and Sons, Berlin, 1985.
- [5] C. H. Flurschein.: *Power Circuit Breakers – theory and design*, Peter Pelegrinus Ltd., 1982.
- [6] CIGRÉ WG 13.01.: Application of Black Box Modelling to Circuit Breakers, *Electra*, No. 149, 1993.
- [7] K. Meštrović: *Sklopni aparati srednjeg i visokog napona*, Graphis, Zagreb, 2007.
- [8] A. Sabot, A. Giard, Y. Maugin: Decay of the DC component of the short-circuit currents on the 420 kV and 245 kV networks of Electricité de France, 4th International Symposium on short-circuit currents in Power Systems, Liege, 1990.
- [9] G. C. Damstra, H. Heiermer, D. Vondereck, M. A. Waldron: Constantes de temps spécifiées pour les essais de tenue au courant asymétrique des appareillages de coupure, *Electra*, No. 173, 1997.