

Goran Malčić, dipl.ing.
Mr.sc. Krešimir Meštrović, prof. v. šk.
Mr.sc. Dubravko Žigman, dipl.ing.
Tehničko veleučilište u Zagrebu - Elektrotehnički odjel

STATISTIČKA ANALIZA ELEKTRIČNIH NAPREZANJA VISOKONAPONSKIH PREKIDAČA

SAŽETAK

Već desetljeće razmatra se mogućnost specificiranja ispitivanja električne trajnosti za prekidače nazivnog napona iznad 72,5 kV. IEC SC 17A je 1996. u Jakartu odredio radnu grupu (kasnije WG29) koja bi proučavala potrebitost i oblik ispitivanja električne trajnosti za moderne prekidače. Gotovo u isto vrijeme CIGRE SC13 formirao je novu grupu WG 13.08 da prouči rad i gospodarenje prekidačima te sakupi informacije o strujama (i učestalosti) kratkog spoja u pogonu.

Stoga je CIGRE WG 13.08 provela internacionalno istraživanje među elektroprivredama, a te rezultate koristile su obje grupe kao statističku podlogu za svoje prijedloge ispitivanja trajnosti. IEC je na kraju izglasao Tehničko izvješće o ispitivanju električne trajnosti, nakon burnih reakcija i pitanja o mogućim matematičkim greškama ili krivim interpretacijama rezultata.

CIGRE TF A3.01 drži da je IEC-ova statistička analiza netočna, što rezultira u ispitnom programu električne trajnosti za VN prekidače koji je pregrub u usporedbi s pogonskim naprezanjima. Zato se kao alternativa predlaže korištenje Monte Carlo metode, što pojednostavljuje i čini realnijom statističku obradu.

Ključne riječi: ispitivanje električne trajnosti, električno naprezanje, struja kratkog spoja, gustoća (učestalost) kvara, prekidač, VN vod, statistička analiza, percentil, razdioba

STATISTICAL ANALYSIS OF THE ELECTRICAL STRESSES FOR HV CIRCUIT-BREAKERS

SUMMARY

Since decennia, the specification of an electrical endurance type test for circuit-breakers with a rated voltage >72,5 kV is under consideration. IEC SC 17A has established a task force (later WG29) at its 1996 meeting in Jakarta to study the necessity of an electrical endurance type test for modern circuit-breakers and to specify such a type test. Almost at the same time CIGRE SC13 has formed a new WG 13.08 to study life management of circuit-breakers and to collect information about short-circuit currents and density in service.

Therefore CIGRE WG 13.08 conducted an international enquiry among utilities, and these informations have been used by both groups as a statistical data of its prepositions for electrical endurance type test. At the end, IEC voted Technical Report about the electrical endurance type test, after some questions have been raised with respect of possible mathematical mistakes or misinterpretations.

It is recognized by CIGRE TF A3.01 that IEC statistical analysis is incorrect, resulting in an electrical endurance test program for HV circuit-breakers that is too severe compared to the stresses in

service. Therefore, as an alternative approach usage of Monte Carlo method is suggested, and it makes statistical evaluation more comprehensive and closer to reality.

Key words: electrical endurance test, electrical stress, short circuit current, fault density, circuit breaker, HV line, statistical analysis, percentile, distribution

1. UVOD

Iako je bio dostupan određeni broj publikacija o broju struja kratkog spoja prekinutih VN prekidačima, nijedan od ovih radova nije bio na širokoj svjetskoj razini. Zato je CIGRE WG 13.08 provela internacionalno istraživanje među elektroprivredama iz 13 zemalja sa 4 kontinenta. Dobiveno je 18 odgovora, ponekad iz par ili svih elektroprivreda u zemlji, ponekad od jedne koja je pokrivala cijelu zemlju. Forma upita je bila što jednostavnija da bi se sakupile pouzdane informacije. Pitanja su bila postavljena jedno za drugim po stanovitom redu da bi elektroprivrede mogle prestati s odgovaranjem kad nisu bile dostupne detaljne informacije. Pitanja o impedancijama visokonaponskih vodova, omjer X0/X1 sustava, omjer X0/X1 vodova, omjer R/X, budući razvoj i sl. nisu uzeta u obzir. Ipak, kasnija IEC-ova radna skupina istraživala je takove parametre na nižoj razini. Rezultati internacionalnog istraživanja podneseni su CIGRE SC 13 na kraju 1997: 13-97(SC)31 IWD i također dani IEC-ovoj radnoj skupini. IEC-ova radna skupina koristila je osnovne informacije dokumenta da simulira ukupna električna naprezanja u radu pomoću softverskih modela i, kao što je navedeno prije, koristila je isto tako i ulazne podatke istraživanja za neke specifične parametre.

IEC-ova radna skupina je kasnije transformirana u regularnu radnu grupu, WG29. Načinila je par prijedloga za specifikaciju ispitivanja električne trajnosti za VN prekidače. Kako su prvi prijedlozi bili prekomplikirani, internacionalna zajednica zatražila je pojednostavljenje predloženih procedura. Nadalje, postavila su se pitanja o potrebi ispitivanja električne trajnosti za moderne prekidače, jer su SF6 prekidači manje osjetljivi na električna naprezanja od njihovih tehnoloških prethodnika.

IEC WG je koristio neke publikacije i postupke da transformira električno trošenje manjim strujama kratkog spoja u broj ispitivanja s većim strujama kratkog spoja. Često su takove formule pojednostavljene tako da je trošenje proporcionalno kvadratu struje kratkog spoja, ali rezultati se podudaraju s iskustvom pogonskih uvjeta (iako su formule izvedene iz laboratorijskih ispitivanja). S iznimkom nekih veoma specijalnih slučajeva, kao što su pomoćni prekidači u laboratorijima visokih snaga ili generatorski prekidači, moderni prekidači ne pokazuju problem izdržljivosti kad prekidaju struje kratkih spojeva u pogonu. Ograničenja električne trajnosti u pogonu će biti češća kad se vrlo često (tisuću do desetak tisuća radnih ciklusa) prekidaju relativno male struje paralelnih ili serijskih kapacitivnih blokova i paralelnih reaktancija, posebno u slučaju ponovnog paljenja i/ili udara.

U suprotnosti s IEC WG, CIGRE WG 13.08 nije bila uvjerenja u potrebu za specificiranje ispitivanja električne trajnosti. Na osnovu sakupljenih statističkih informacija, CIGRE WG 13.08 je bila za kombinaciju ispitivanja električne trajnosti i postojećih obaveznih ispitivanja (npr. provođenje T10, T30, T60 i T100 bez servisiranja između) da bi test bio jeftin i jednostavan. Razlog različitih mišljenja IEC WG29 i CIGRE WG 13.08 je interpretacija statističkih podataka. Pozadinske informacije o stohastičkim osnovama za statistički izračun i problemi pri kombiniranju dvije statističke razdiobe bit će dani u tekstu.

Internacionalni elaborat CIGRE WG 13.08 može se razbiti u dvije kategorije prikupljenih informacija. Jedna kategorija je o broju prekinutih struja kratkog spoja a druga o amplitudi istih. Pokriveno je 70000 prekidačkih godina i 900000 km*godina vodova u klasi napona iznad 63kV.

2. BROJ KRATKIH SPOJEVA

2.1. Sakupljanje podataka

Po naponskim klasama traženi su: broj kvarova (kratkih spojeva) po godini, broj prekidača, broj prekidača na visokonaponskim vodovima, broj kvarova na 100 km visokonaponskog voda u godini, statistička distribucija (razdioba) broja kvarova po visokonaponskom vodu, postoci jednopolognog, dvopolognog odnosno tropolognog kratkog spoja, postoci automatskog ponovnog uklapanja (O-C, O-CO-C, O-CO-CO), broj kvarova po 100 km kabela po godini, po 100 transformatora po godini i po sabirnici po godini.

Više od 90 % kvarova događa se na visokonaponskim vodovima, što znači da se sa stajališta električne trajnosti može suziti spektar na prekidače na VN vodovima. Za više napone 90 % kvarova su jednofazni; za niže 70%. 60% jednofaznih i 66% dvofaznih kvarova događa se u istoj fazi (polu). Ovo je uzrokovano statističkim raspršenjem zbog malo broja kvarova po VN vodu i može se jednostavno objasniti bacanjem kocke ograničeni broj puta: prosječna vjerovatnost da se okreće određeni broj kocke je 1/6, ali 12 bacanja zasigurno neće rezultirati u 2 pogotka po broju.

Podaci sakupljeni o automatskom ponovnom uklopu govore da ih je 80% bilo uspješno u prvom, 5% u drugom ponovnom uklopu, a u 15% trebala je čitava sekvenca.

Iz sakupljenih podataka broj kvarova po 100 km VN voda pokazuje se otpriklike obrnuto proporcionalan naponskom nivou. Iz informacija elaborata ili iz odvojenih informacija sakupljenih od većine elektroprivreda prosječna duljina voda može se izračunati/procijeniti, ali i zaključiti da je duljina voda proporcionalna naponskom nivou. Zato je CIGRE WG 13.08 došao do zaključka da je broj kvarova po VN vodu manje ili više nezavisno od naponskog nivoa, kao što će biti obrazlagano u narednim poglavljima. Ovaj zaključak je ugrubo potvrđen razdiobom kvarova za razne napone velike elektroprivrede.

Najvažniji sakupljeni podaci bili su o prosječnom broju kvarova po 100 km VN voda i o prosječnoj duljini voda. Ovi podaci sakupljeni su po naponskom nivou. Nisu upotrijebljeni svi odgovori, jer su neke elektroprivrede imale mali broj duljine VN vodova na određenom naponskom nivou a jedna je dala iznimno visok broj kvarova za 550 kV (11.8 po 100 km VN voda). Nadalje, nisu bile poznate sve prosječne duljine vodova. Tablica 1 daje broj odgovora korištenih u obradi.

Tablica 1. Broj odgovora korištenih u obradi

Broj odgovora	< 100 kV	100-200 kV	200-300 kV	300-500 kV	500-700 kV	> 700 kV
#/100 km	8	14	16	10	6	1
km real.	3	6	9	7	1	1
km proc.	2	4	5	3	3	

Broj odgovora je veoma mali i zbog toga je statistička baza manjkava za daljnju obradu. Ipak, izlazni podaci obrade pokazuju da rezultati nisu predaleko od brojki spominjanih u literaturi. Također, jasno je vidljiva tendencija da broj kvarova po VN vodu nije ovisan o naponskom nivou, kao što je spomenuto prije.

Još jedna stvar koju treba uvažiti jest da se dani odgovori odnose na prosječne vrijednosti za tu zemlju ili elektroprivredu po naponskom nivou. U CIGRE-ovoj procjeni podaci se tretiraju kao zasebni a ne prosječni odgovori: svi podaci u pozadini prosječnih su nepoznati. To znači da je prosječna vrijednost za WG 13.08 prosjek danih odgovora a ne prosjek svih podataka u pozadini odgovora. Slično npr., 90%-tni percentil je izračunata vrijednost iznad koje 10% odgovora upada, a 90% ispod ne. To nije 90%-tni percentil svih podataka u pozadini odgovora. Iznimno ekstremni podaci mogu prouzročiti veće varijacije nego dana zbirka odgovora.

S druge strane, bilo bi iznimno teško, ako ne i nemoguće, sakupiti sve podatke u pozadini odgovora, bez obzira na pitanje da li sve podatke treba tretirati jednakom ili prema zemlji elektroprivrede. Svakako, sami odgovori već su dali široka odstupanja kao što se vidi u Tablici 2, gdje su odgovori upotrijebljeni kao što su navedeni u Tablici 1.

Tablica 2. Varijacije u odgovorima međunarodnog istraživanja

# kvarova po 100 km i godini	< 100 kV	100-200 kV	200-300 kV	300-500 kV	500-700 kV	> 700 kV
Srednja vrijednost	11.5	5.1	3.1	2.0	2.0	1.7
Medijan	10.5	4.7	2.3	2.0	1.2	1.7
Maksimum (max)	27.8	16	14.5	4.0	5.7	1.7
Minimum (min)	1.0	0.7	0.9	0.3	0.5	1.7
Max/min	28	23	16	13	11	1

2.2. Obrada podataka

Razlika između srednje vrijednosti i medijana pokazuje postoji li velika devijacija od normalne razdiobe. Da bi se izračunali postoci, treba biti oprezan pa je zato CIGRE WG 13.08 točno opisao algoritme primjenjene (za izračun 90%-tnog i 10%-tnog percentila). U svom pristupu definirali su maksimum kao 100%-tni percentil a minimum kao 0%-tni, čak i za podgrupe upitnika sa samo par odgovora.

IEC-ova politika je da se pokrije 90% slučajeva u pogonu. Zato je važno tražiti akumulirana električna naprezanja koja pokrivaju 90% slučajeva. Poradi toga treba biti procijenjen broj kvarova po VN vodu. CIGRE WG 13.08 računao je po paru odgovora – broj kvarova po 100km i duljina voda – (prosječni) broj kvarova po VN vodu. Onda, iz rezultata po naponskom nivou, računala se srednja vrijednost, medijan i 90%-tni percentil. Ova zadnja vrijednost pokazala se usporedivom za različite naponske nivoi i nije previše odstupala od ukupnog 90%-tnog percentila (3.3); vidi Tablicu 3. Pristup IEC WG bio je drugačiji, jer su oni rabili 90%-tni percentil gustoće kvarova zajedno s 90%-nim percentilom duljine voda po naponskom nivou, pa su dobili veće vrijednosti prema Tablici 4. Prema mišljenju CIGRE WG 13.08, IEC-ove vrijednosti vode 99%-tnom percentilu. IEC-ov argument je da duljina voda nije toliko važna jer dalji kraj voda daje male vrijednosti struja kratkog spoja, koje gotovo da nemaju doprinosa u električnom trošenju.

Tablica 3. Broj kvarova po VN vodu (CIGRE)

# kvarova po VN vodu i godini	< 100 kV	100-200 kV	200-300 kV	300-500 kV	500-700 kV	> 700 kV
Srednja vrijednost	2.2	2.0	1.4	1.5	1.4	2.8
Medijan	2.3	1.6	1.1	1.3	1.1	
90%-tni percentil	3.3	3.8	3.2	2.6	2.6	

Tablica 4. Broj kvarova po VN vodu (IEC)

90%-tni percentil	< 100 kV	100-200 kV	200-300 kV	300-500 kV	500-700 kV	> 700 kV
Gustoća kvarova	17.3	8.3	4.8	3.3	4.2	1.7
Duljina voda	39	76	107	125	153	268
# kvarova po VN vodu i godini	6.7	6.3	5.1	4.1	6.4	4.6

3. AMPLITUDE STRUJA KRATKOG SPOJA

3.1. Sakupljanje podataka

Elektroprivrede su zatražene da popune histogram maksimalne očekivane struje kratkog spoja u postrojenju (Ib) podijeljene sa (maksimalnom) rasklopnom strujom kratkog spoja prekidača (Ir). Pet elektroprivreda odgovorilo je na pitanje dajući 12 histograma (za različite napone). Druge dvije elektroprivrede dale su srednje vrijednosti i 90%-tni percentil za 6 klasa. Zbog toga što je broj odgovora čak manji nego u prethodnom poglavljiju statistička analiza bit će daleko od precizne: to je jasno iz evaluacije CIGRE WG 13.08, gdje je ukupni prosjek Ib-a između 40% i 60% Ir-a, a ukupni 90%-tni percentil Ib-a između 70% i 80% Ir.

Par ograničenja uzrokovalo je veliku razliku između Ib i Ir, kao što je mala vjerojatnost da se ispune uvjeti za maksimalnu struju kratkog spoja, ograničenje elektroprivrede za budući razvoj, ograničenje zbog diskretnih koraka u standardnoj procjeni i sl.

Dvije elektroprivrede načinile su odličan posao verificiranjem sakupljenih informacija u svom zaštitnom sustavu i izdvajanjem podataka o stvarnim kratkim spojevima u pogonu. Na stvarnu struju kratkog spoja utječe impedancija do mjesta kratkog spoja, broj uključenih faza, X0/X1 omjer sustava i

vodova, snaga kratkog spoja na sabirnicama, otpor električnog luka na mjestu kvara itd. Iz danih izraza CIGRE WG 13.08 procijenio je da srednja vrijednost stvarnih struja kratkog spoja iznosi 20% I_r -a a da je 90%-tni percentil između 30% i 40% I_r -a.

3.2. Obrada podataka

Za razliku od gustoće kvarova, za omjer I_b/I_r CIGRE WG 13.08 nije pravio razliku prema naponskim nivoima. Sve vrijednosti iz histograma su stavljene zajedno i od tamo su računate postotne vrijednosti (percentili). Tablica 5 daje pregled toga.

IEC WG29 je samo računala i rabila 90%-tni percentil omjera I_b/I_r , ali i s druge strane, pravila razliku između naponskih razina, bazirano na podacima dvije velike elektroprivrede: Tablica 6.

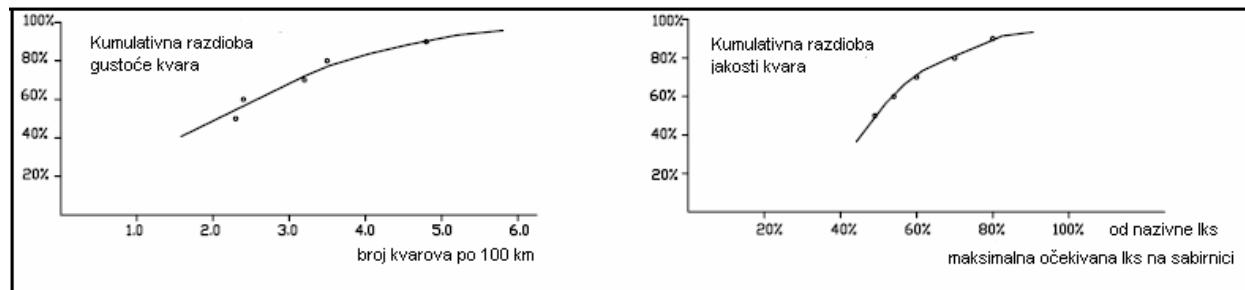
Tablica 5. Procijenjeni percentili I_b/I_r (CIGRE)

50%-tni percentil	0.49
60%-tni percentil	0.54
70%-tni percentil	0.60
80%-tni percentil	0.70
90%-tni percentil	0.80

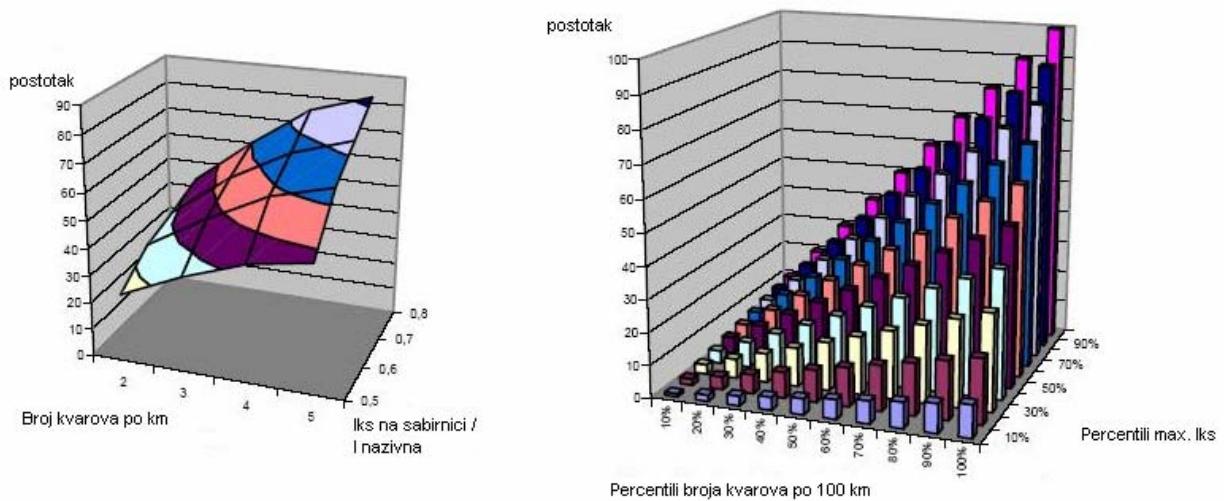
Tablica 6. Procijenjeni 90%-tni percentil I_b/I_r (IEC)

90%-tni percentil	< 100 kV	100-200 kV	200-300 kV	300-500 kV	500-700 kV	> 700 kV
I_b/I_r	0.62	0.73	0.76	0.78	0.74	0.66

4. KOMBINACIJA DVIJE RAZDIOBE



Slika 1. Kumulativne razdiobe za prekidače (245 kV)



Slika 2. Kumulativna razdioba gustoće kvarova i Iks

Slika 3. Kumulativna razdioba gustoće kvarova i Iks

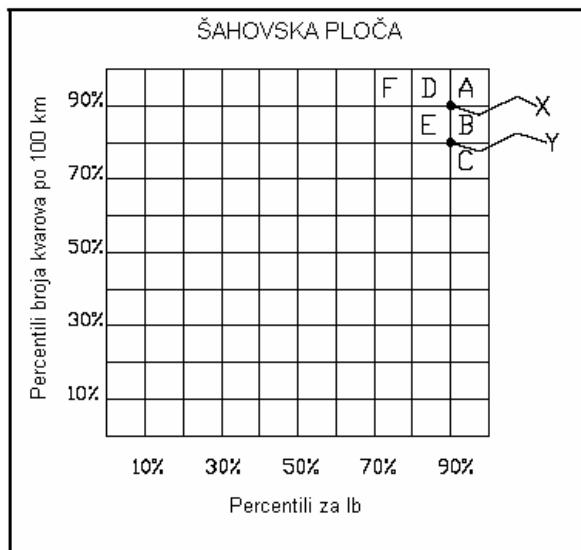
4.1. Kumulativna razdioba

Na Slici 1 dana je kumulativna razdioba gustoće kvarova i maksimalne očekivane struje kratkog spoja na sabirnicama, izračunato od CIGRE WG 13.08. Obje distribucije su promatrane kao nezavisne, tako da se mogu staviti u trodimenzionalni kumulativni prikaz razdiobe s gustoćom na x-osi, jakosti na y-osi i vjerojatnošću na z-osi, kao što je pokazano na Slici 2.

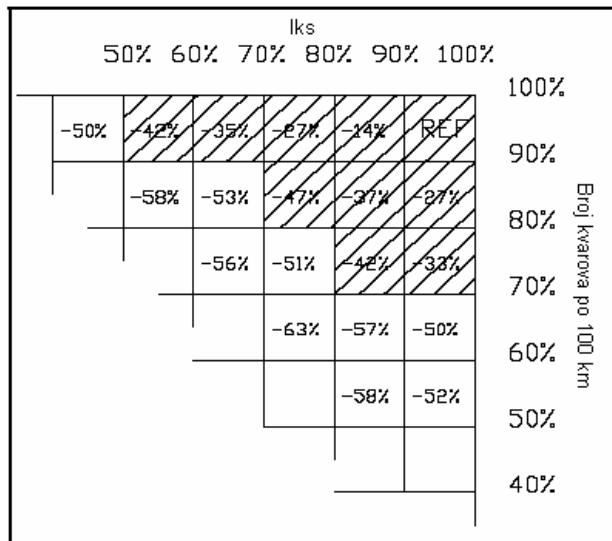
4.2. Pristup "šahovske ploče"

Odlučeno je da se odabere malo drugačiji pristup, stavljanjem vjerojatnosti za gustoću (postotne vrijednosti kvarova po 100 km VN vodova – percentili) na x-os a vjerojatnosti za jakost (percentili Ib/Ir) na y-os. Dvodimenzionalna kumulativna razdioba može se izračunati iz percentila, o čemu će biti riječi, i kao što je pokazano na Slici 3. Model vjerojatnosti duž x i y-osi zove se šahovska ploča: Slika 4.

Točka X predstavlja kombinaciju 90%-tnog percentila jakosti i 90%-tnog percentila gustoće. Gornjem redu pripadaju prekidači koji imaju više kvarova po 100 km po godini od 90%-tnog percentila, t.j. 10% prekidača. Najdesnijem stupcu pripadaju prekidači instalirani u situacijama s maksimalnom očekivanom strujom kratkog spoja većom od 90%-tnog percentila; ponovno 10% prekidača. Kvadrat A predstavlja sve prekidače s brojem kvarova većim od 90%-tnog percentila i većim strujama kratkog spoja od 90%-tnog percentila; zato kvadrat A sadrži 1% cijele populacije.



Slika 4. Šahovska ploča



Slika 5. Redukcija naprezanja

81% ukupnog broja prekidača ima gustoću kvara manju od 90%-tnog percentila i struju kratkog spoja manju od 90%-tnog percentila; t.j. 81 kvadrat ispod i lijevo od točke X. Desni stupac do kvadrata A (9 kvadrata) su prekidači sa strujom kratkog spoja većom od 90%-tnog percentila, ali s manje kvarova od 90%-tnog percentila broja kvarova po 100 km. Gornji redak do kvadrata A (9 kvadrata) predstavlja 9% prekidača koji imaju veći broj kvarova od 90%-tnog percentila, ali manju maksimalnu očekivanu struju kratkog spoja na sabirnicama od 90%-tnog percentila.

Svaki kvadratič predstavlja 1% ukupne populacije. Točka Y predstavlja kombinaciju 80%-tnog percentila gustoće kvarova i 90%-tnog percentila jakosti. 2% svih prekidača imaju gustoću između 80%-tnog i 100%-tnog percentila zajedno s jakošću između 90%-tnog i 100%-tnog percentila. Pola ovih prekidača su u kvadratu A (između 90%-tnog i 100%-tnog percentila) a drugih 1% su u kvadratu B (80%-90% percentila i 90%-100% percentila).

U svakom kvadratu električno trošenje može se dati kombinacijom percentila (u kvadratu A za točku X, u kvadratu B za točku Y itd.). Bit će pokazan slučaj 90%/90% u kvadratu A i to kao referentni slučaj, jer je IEC WG koristio ovu kombinaciju da specificira ispitivanje električne trajnosti (rabeći donekle drugačije vrijednosti za 90%-tne percentile Ib/Ir; usporedi Tablice 5 i 6). U ostalim kvadratima bit će dana redukcija električnog trošenja u usporedbi s danim referentnim slučajem.

Specijalnim programskim paketom, za svaki naponski nivo i svaki rang struje kratkog spoja može se izračunati razdioba kvarova duž voda i amplitude struja kratkog spoja, uzimajući u obzir određeni broj parametara kao duljinu voda, impedanciju voda, broj uključenih faza, automatski ponovni uklop, parametre sustava itd. Razdioba izračunatih struja kratkog spoja se pretvara u ekvivalentan broj T100 prekidanja (samo "O" operacije) primjenom odgovarajuće formule.

Izlazni podatak ove primjene pokazuje da je broj T100 prekidanja proporcionalan pretpostavljenoj gustoći kvarova, kao što se može očekivati. Za 245 kV redukcija od reda do reda dana je u Tablici 7. Efekti percentila za struju kratkog spoja su veoma komplikirani i ne mogu se ekstrapolirati: potreban je programski paket. Za prekidač 245/40 kA izračunat je desni gornji kut šahovske ploče (Slika 5).

Sljedeći korak je određivanje kojih 10% prekidača (kojih 10 kvadrata) predstavlja najveća električna naprezanja. Ili, drugim riječima, 90% prekidača će imati manje električno trošenje nego oni u tih 10 kvadrata (tj. imat će veću redukciju nego oni u tih 10 kvadrata). U danom primjeru redukcija od -47% ispuniti će taj zahtjev: zasjenjeni kvadrati na Slici 5.

Druge naponske razine i rangovi struja kratkog spoja daju drugačije uzorke i redukcije.

Tablica 7. Redukcija percentila gustoće kvarova

Percentil gustoće	#/100 km	Redukcija
90%-tni percentil	4.8	-
80%-tni percentil	3.5	-27%
70%-tni percentil	3.2	-33%
60%-tni percentil	2.4	-50%
50%-tni percentil	2.3	-52%

5. ISPITNI PROGRAM ELEKTRIČNE TRAJNOSTI PREMA IEC TR 62271-310

U IEC-ovom Tehničkom izvješću (Technical Report) dan je slijedeći ispitni program koji simulira električno trošenje u pogonu:

Tablica 8. Ispitni program trošenja prema IEC-u

	Nazivna prekidna struja KS			
	≤ 40 kA	50 kA	63 kA	80 kA
T60 prekidanje	21 O	15 O	10 O	7 O
T10 prekidanje	9 O	9 O	9 O	9 O

Nakon ove faze "trošenja", provodi se još dodatno ispitivanje ("ispitivanje kod preuzimanja") koje sadrži T10, L75 i LC1 ispitne cikluse kako bi se dokazalo da je prekidač sposoban izvršiti svoje osnovne prekidne zadaće.

Uz pomoć formule (1) moguće je efekt trošenja pri manjim strujama (I_{ks}) izraziti preko dijela 100%-tne referentne struje (I_r), pa se gornja tablica može prikazati kao:

Tablica 9. T100 prekidanja prema IEC-u

	Nazivna prekidna struja KS			
	≤ 40 kA	50 kA	63 kA	80 kA
T100 prekidanje	8.8 O	6.3 O	4.2 O	2.9 O

6. ALTERNATIVNI PRISTUP: MONTE CARLO METODA

6.1. Metodologija

Zbog mnogo dvojbi i kritika oko aspekata pristupa radne grupe IEC-a ovdje je prikazan potpuno novi statistički pristup koji izbjegava matematičke komplikacije i nesigurnosti.

Ideja je generirati kvarove kompjuterskim programom, koji ima istu frekvenciju događaja, istu distribuciju 1., 2. i 3. faze, istu stalnost APU-a (O-C ili O-CO-C ili O-CO-CO), i isti doprinos naprezanja faza kao što je propisano pomoću statistike sakupljene od CIGRE WG 13.08. Kvarovi se događaju na slučajno odabranim lokacijama na VN vodu u električnom sustavu sastavljenom od:

- izvora, koji imaju istu razdiobu kvarova i druge karakteristike sakupljene od CIGRE WG 13.08 i drugih i
- VN vodova koji imaju karakteristiku (direktnu i 0-tu impedanciju, duljinu) prema CIGRE WG 13.08 i drugima.

Praktički, ovo vodi na konstrukciju adekvatne funkcije razdiobe koja se optimalno uklapa u polje podataka relevantne kvantitete. Onda, kockama, koje imaju odgovarajuću težinu prema funkciji razdiobe parametara sustava (duljina voda i impedancije, jakost izvora) određuje se sustav.

Potom se generira slučajan kvar na vodu; odgovarajućom kockom određuje se tip kvara, izdržljivost i naprezanja faza. Tako nastaje struja kvara, koja se pretvara u ekvivalentni dio cijelog 100%-tnog strujnog naprezanja prema (1). Ova procedura generiranja kvarova se ponavlja na istom sustavu određeni broj puta, ovisno o funkciji gustoće kvarova. Suma svih ekvivalentnih 100%-nih strujnih dijelova je onda električno naprezanje, izraženo brojem 100%-nih strujnih naprezanja, za zadani prekidač.

Ova procedura ponavlja se za mnogo drugačijih sustava. Tako nastaje razdioba broja ekvivalentnih 100%-nih strujnih naprezanja. 90%-tni percentil ove razdiobe trebao bi biti 90%-tni percentil električnog naprezanja. Kako je većina statističkih podataka sakupljeno za određeni naponski nivo, cijela procedura mora se ponavljati za svaki naponski nivo i svaku maksimalnu rasklopnu struju kratkog spoja.

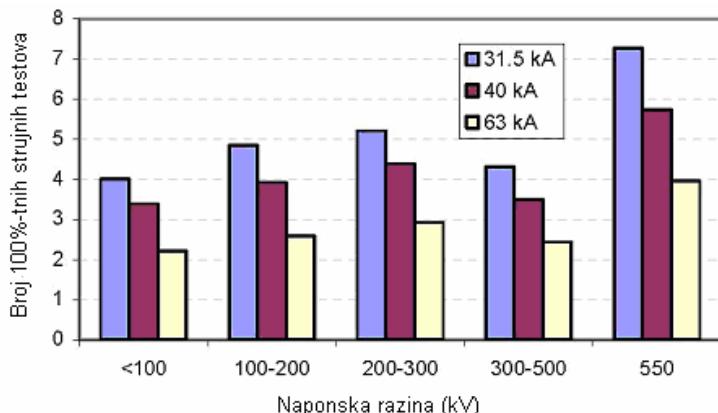
$$f_E = 3.915 \left(\frac{I_{KS}}{I_r} \right)^3 \text{ za } I_{KS} < 0.35I_r; \quad f_E = 3.915 \left(\frac{I_{KS}}{I_r} \right)^{1.7} \text{ za } I_{KS} \geq 0.35I_r \quad (1)$$

6.2. Rezultati

U tablici ispod sabrani su 90%-tni percentili 100%-tnog stujnog naprezanja (broj T100 prekidanja) određenih struja i naponskih razina kroz period od 25 godina (vidi i graf). Uspoređeni su s prijedlozima IEC TR 62271-310 (drugi stupac).

Tablica 10. Broj ekvivalentnih 100%-nih prekidanja

	IEC TR 62271-310	Monte Carlo metoda				
Nazivna struja kratkog spoja (kA)		<100 kV	100-200 kV	200-300 kV	300-500 kV	550 kV
31.5	8.8	4.01	4.85	5.21	4.31	7.28
40	8.8	3.39	3.93	4.39	3.50	5.73
63	4.2	2.22	2.60	2.93	2.44	3.96



Slika 6. Broj 100%-nih prekidanja (testova) prema naponskoj razini i nazivnoj Iks

7. ZAKLJUČAK

Rasprave IEC-a i rezultati glasanja ilustriraju dvosmislenost glede ispitivanja električne trajnosti za prekidače od 72,5 kV naviše. Neke elektroprivrede zagovaraju korisnost takvih ispitivanja, druge sumnjaju jesu li testovi reprezentativni za životni vijek u stvarnom pogonu jer ne mogu zamisliti da veliki broj prekidanja odgovara visokim strujama kratkog spoja. A opet drugi stručnjaci tvrde da je par prekidanja asimetričnih struja kratkog spoja (T100A) puno gore od relativno visokog broja prekida simetričnih struja. Predmet ispitivanja električne trajnosti zasigurno još nije konačno riješen.

IEC Tehničko izvješće 62271-310 nudi veliku fleksibilnost u specifikaciji ispitivanja električne trajnosti, uključujući početnu definiciju. Ispitivanje nije obvezatno i sastoji se od dva dijela: dio starenja i dio provjere. Fleksibilnost je u dijelu starenja, dok je dio provjere obavezan i precizno propisan. Starenje može biti (djelomično) pokriveno testovima "normalnog" kratkog spoja. Kao što je običaj s IEC-ovim Tehničkim izvješćima, u nadolazećim godinama ocijenjivat će se postotak primjene testova i dobiveno iskustvo specifikacijom ispitivanja električne izdržljivosti za prekidače s nazivnim naponom iznad 72.5 kV.

CIGRE TF A3.01 drži da je statistička analiza iza IEC 62271-310 netočna, što rezultira u ispitivanju električne trajnosti za VN prekidače koja je pregruba u usporedbi s procijenjenim naprezanjima u pogonu koja će doživjeti 90% prekidača.

Nađene su evidentne greške, ali i sami autori unutar CIGRE skupine ne slažu se s valjanošću njihovih rješenja. Ipak, sigurno je da, osim grešaka, statistička analiza iz IEC TR 62271-310 može biti bitno pojednostavljena.

Zato je napravljen novi pristup koji treba biti razumljiviji i bliži realnosti. Monte Carlo metoda predviđa električna naprezanja u pogonu na prekidačima bazirano na sljedećim statističkim varijablama: gustoća kvara, duljina voda, stvarna maksimalna struja kratkog spoja u stanici, impedancije voda i transformatora, distribucija vrsta kratkih spojeva, niz sklapanja (APU) i naprezanje faza. Sve ove veličine dolaze od terenskog istraživanja i dobro su dokumentirane.

Električna naprezanja u pogonu su grubo procijenjena na 50% od onih IEC TR 62271-310 ispitnog programa.

Električna naprezanja koja prekidač doživi kod standardnog IEC 62271-100 ispitivanja (T100 prekidanja, otprilike 5 punih 100%-nih strujnih testova) prelaze predviđena električna neprezanja u pogonu za većinu slučajeva.

8. LITERATURA

- [1] Electrical endurance Testing for Circuit Breakers rated 72.5 kV and above, IEC TR 62271-310 (2004)
- [2] An International Survey on Electrical Stresses on High Voltage Circuit-Breakers in Service, 13-97 (SC) 31 IWD, 1977
- [3] Life Management of Circuit Breakers, CIGRE Technical Brochure 165, August 2000.
- [4] Electrical Endurance and Reliability of Circuit-Breakers; A. Pons, A. Sabot, G. Babusci, IEEE/PD, Vol. 8, No. 1, Jan '93, pp. 168-174