

MEHANIČKI UČINCI STRUJA KRATKOGA SPOJA NA SUSTAV UŽETNIH SABIRNICA

MECHANICAL EFFECTS OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS ON STRAIN BUSBARS SYSTEM

Davor Petranović

Tehničko Veleučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

SAŽETAK

U ovom radu opisana je analiza mehaničkih učinaka struja kratkoga spoja na visokonaponske užetne sabirnice. Na temelju razvijenog fizikalnog modela izrađen je program KSUSAB koji računa ponašanje užetnih sabirnica u stacionarnom i dinamičkom stanju. Program je izrađen u programskom alatu MATLAB. Model i program KSUSAB su verificirani na mjerenom primjeru u verificiranom laboratoriju, a nakon toga su izvršene analize ovisnosti užetnih sabirnica o veličinu struje kratkoga spoja, faznosti kratkoga spoja, trajanja kratkoga spoja, postojanju APU i istovremenog djelovanja vjetra.

Ključne riječi: *vanjsko postrojenje, užetne sabirnice, struje kratkoga spoja, mehanički učinci*

ABSTRACT

This paper describes the analysis of the mechanical effects of short - circuit currents on high - voltage strain busbars. Based on the developed physical model, the KSUSAB program was developed, which calculates the behaviour of strain buses in stationary and dynamic state. The program was created in the MATLAB software tool. The KSUSAB model and program were verified on a measured example in a verified laboratory, after which analyses of the dependence of strain busbars on the magnitude of short-circuit current, short-circuit type, short-circuit duration, APU existence and simultaneous wind action were performed.

Keywords: *switchyard, strain busbars, short-circuit currents, mechanical effects*

1. UVOD

1. INTRODUCTION

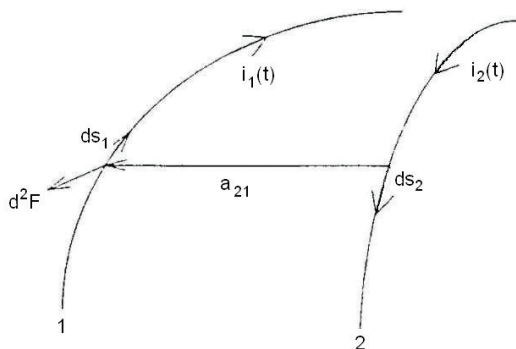
Visokonaponske užetne sabirnice su važan dio transformatorskih stanica i elektroenergetskih postrojenja. Svaki kvar na njima je veći kvar u elektroenergetskom sustavu i potrebno je izučiti pojave pri protjecanju struje kratkoga spoja kroz užetne sabirnice. Protjecanje velikih struja kratkoga spoja izaziva povećane sile u ovjesištima užetnih sabirnica i otklone faznih vodiča u rasponu. Sabirnički portali se moraju pojačano dimenzionirati, a mora se paziti i na međufazni razmak. Za neke standardne oblike i standardna opterećenja postoje upute za proračun [1]. Te upute ipak nisu pogodne za nepravilne geometrije, kombinacije opterećenja (istovremeni utjecaj struje kratkoga spoja i vjetra) i specijalna strujna opterećenja (automatsko ponovno uključenje nadzemnih dalekovoda - APU). Zbog toga je bilo potrebno razviti fizikalni model i program za računalno koji bi mogao riješiti takve slučajeve [3].

2. MODEL PRORAČUNA UČINAKA STRUJA KRATKOGA SPOJA NA UŽETNE SABIRNICE

2. MODEL FOR CALCULATING THE EFFECTS OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS ON STRAIN BUSBARS

Mehanički učinci struje kratkoga spoja su manifestacija odziva sabirnica na uzbudne sile kratkoga spoja. Kratki spoj izaziva njihanje ili rotaciju užetnih sabirnica. Osnova proračuna mehaničkih učinaka struja kratkoga spoja je sila između dva vodiča protjecana strujama.

Na slici 1 je prikazan prostorni odnos dvaju vodiča i način proračuna sile između njih.



Slika 1 Sile između dva vodiča protjecana strujom

Figure 1 Forces between two current-carrying conductors

Struje kratkoga spoja induciraju sile u elementima, kojima protječe struja kratkoga spoja te izazivaju njihov otklon. Elektromagnetska sila na vodič kojim teče struja $i_1(t)$ u magnetskom polju drugog vodiča, kojim teče struja $i_2(t)$ je definirana pomoću izraza:

$$d^2\vec{F}_1 = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} i_1(t) i_2(t) \frac{d\vec{s}_1 \cdot x (d\vec{s}_2 \cdot x \vec{a}_{21})}{a_{21}^3} \quad (1)$$

Sila se računa za sve dijelove kroz koje protječe struja, tako i za dijelove istog vodiča.

Izraz za silu pokazuje ovisnost o vremenu (umnožak iznosa vremenski promjenjivih struja) i geometriji (vektorski umnožak vektor oba smjera struje i udaljenosti dijelova).

Ako struje teku u istom smjeru vodiči se privlače, a u suprotnom odbijaju. Budući se sile mijenjaju vremenski i prostorno nije bilo moguće koristiti neki od gotovih program temeljenih na MKE, već se moralo prići modeliranju i programiranju vlastitog programa KSUSAB.

Užetne sabirnice se modeliraju mrežom opruga i masama u čvorovima te mreže. Granični uvjeti te mreže su nepomični čvorovi na mjestima ovjesišta na gredama portala. Definicija koordinatnih osi je takva da je x-os uzduž sabirnice, y-os poprečna na sabirnici i z-os je usmjerena u vis.

Ukupna masa pomičnog čvora mču je jednaka zbroju mase čvora (npr. masa otcjepne stezaljke i otcjepnog vodiča) i polovice mase grana spojenih na taj čvor.

Sile u krajnjim čvorovima izolatorskog lanca (između nepomičnog čvora na gredi i pomičnog čvora na kraju izolatorskog lanca) se računaju prema sljedećim jednadžbama:

$$\vec{F}_o = -k \cdot (p_i - p_o) \quad (2)$$

- F_o - sila na kraju izolatorskog lanca (N)
- p_i - pozicija čvora na kraju izolatorskog lanca (m)
- p_o - pozicija nepomičnog čvora ovješena na gredi portala (m)
- k - konstanta krutosti portala (N/m)

Gravitacijske sile na čvorove se računaju prema sljedećim jednadžbama:

$$F_g = [0; 0; -g \cdot m_a] \quad (3)$$

- F_g - gravitacijska sila (N)
- g - gravitacija (m/s^2)

Sile uslijed poprečnog vjetra se računaju prema sljedećim jednadžbama:

$$F_v = \left[0; \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (l_g \cdot d_g \cdot p); 0 \right] \quad (4)$$

- F_v - sila uslijed vjetra (N)
- n - broj spojenih grana na promatrani čvor
- l_g - duljina grane (m)
- d_g - promjer grane (m)
- p - poprečni pritisak vjetra (N/m^2)

Proračun unutarnje sile u granama se vrši prema sljedećim jednadžbama:

$$l_g = l_{g0} \cdot [1 + \beta \cdot (t - \theta)] \quad (5)$$

$$F_e = \frac{l_g - l_{g0}}{l_g} E \cdot A \quad (6)$$

$$\vec{F}_a = \sum_{i=1}^n \vec{F}_e \quad (7)$$

- l_g - trenutna duljina grane (m)
 l_{gt} - duljina nezategnute grane na trenutnoj temperaturi (m)
 l_{g20} - duljina nezategnute grane na referentnoj temperaturi (m)
 β - temperaturni koeficijent rastezanja vodiča ($1/^\circ\text{C}$)
 t - temperatura vodiča ($^\circ\text{C}$)
 E - modul elastičnosti grane (N/m^2)
 A - presjek grane (m^2)
 F_c - unutarnja sila u grani uslijed njenog rastezanja ili stezanja (N)
 F_{eu} - ukupna sila na čvor uslijed unutarnjih sila u spojenim granama (N)

Uvjeti stacionarnog proračuna (prije nastanka kratkog spoja) je da su sve ukupne stacionarne sile po koordinatnim smjerovima (x, y i z) na svaki pomični čvor jednake nuli.

$$\vec{F}_{st} = \vec{F}_o + \vec{F}_g + \vec{F}_v + \vec{F}_a = \vec{0} \quad (8)$$

- F_{su} - ukupna statička sila (N)

Ovaj sustav nelinearnih jednadžbi ima $n_c \times 3$ nelinearnih jednadžbi. Jednadžbe su krute (eng. stiff) zbog unutarnjih sila koje se jako mijenjaju u ovisnosti o razmaku krajnjih čvorova grana.

Sile na vodljive grane uslijed protjecanja struje kratkoga spoja se računaju prema jednadžbi (1) i prema sljedećim jednadžbama.

$$\vec{F}_{ksu} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \vec{F}_{ksi} \quad (9)$$

- F_{ksu} - ukupna sila uslijed struje kratkoga spoja na čvor (N)
 F_{ks} - sila uslijed struje kratkoga spoja na središte vodljive grane (N)

Kod dinamičkog proračuna akceleracija masa čvorova ovisi o trenutnim ukupnim dinamičkim silama na čvorove.

$$\vec{F}_a = \vec{F}_o + \vec{F}_g + \vec{F}_v + \vec{F}_a + \vec{F}_{ksu} \quad (10)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{F_{dux}(t, x, y, z)}{m} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{F_{duy}(t, x, y, z)}{m} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} - \frac{F_{duz}(t, x, y, z)}{m} = 0 \quad (13)$$

- F_{dux} - ukupna dinamička sila na čvor u x-smjeru (N)
 F_{duy} - ukupna dinamička sila na čvor u y-smjeru (N)
 F_{duz} - ukupna dinamička sila na čvor u z-smjeru (N)

Početno rješenje za x-, y- i z-koordinate pomičnih čvorova su rezultat stacionarnog proračuna, a prve derivacije koordinata (brzine pomičnih čvorova) su jednake nuli, jer sabirnica prije početka protjecanja struje kratkoga spoja miruje.

Jednadžbe su krute zbog unutarnjih sila koje se jako mijenjaju u ovisnosti o razmaku krajnjih čvorova grana.

3. PROGRAM KSUSAB

3. KSUSAB PROGRAM

Program KSUSAB je napisan u programskom okruženju MATLAB [4] s njegovim programskim alatima. Glavni program KSUSAB.m vrši upis ulaznih podataka, ispis i crtanje izlaznih rezultata, a u svom radu poziva potprograme iz MATLAB biblioteke.

Potprogram fsolve.m (iz Matlab biblioteke) [5] računa stacionarni model užetnih sabirnica vršeći proračun sustava nelinearnih jednadžbi definiranih u potprogramu stmod.m. Potprogram stmod.m opisuje stacionarni model užetnih sabirnica, koristeći konfiguraciju (mreža čvorova i opruga), unutarnje sile uslijed krutosti opruga i vanjske sile uslijed mase čvorova i pritiska vjetra.

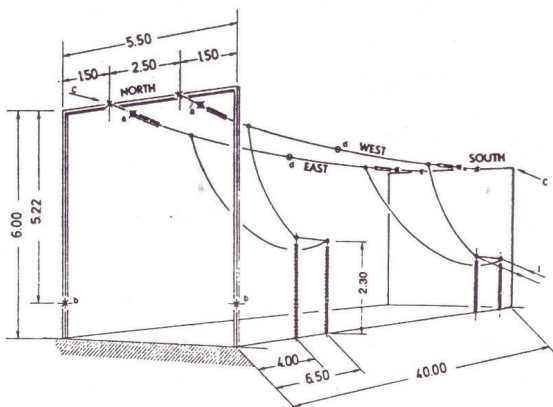
Potprogram ode15s.m (iz Matlab biblioteke) [6] računa dinamički model užetnih sabirnica vršeći proračun sustava nelinearnih diferencijalnih jednadžbi definiranih u potprogramu dimod.m.

Potprogram dimod.m opisuje dinamički model užetnih sabirnica, koristeći konfiguraciju (mreža čvorova i opruga), unutarnje sile uslijed krutosti opruga i vanjske sile uslijed mase čvorova, pritiska vjetra i struja kratkoga spoja.

4. VERIFIKACIJA PROGRAMA KSUSAB

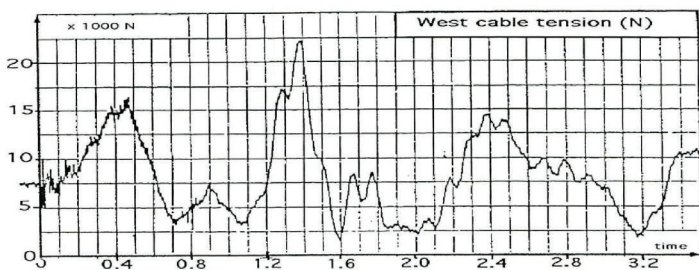
4. KSUSAB PROGRAM VERIFICATION

Program KSUSAB je verificiran usporedbom s rezultatima mjerenja na ispitnim sabirnicama izgrađenim u laboratoriju Laborec, Belgija [1,2]. Sastoje se od dviju vodiča zapadnog (WEST) i istočnog (EAST). Vršio se pokus dvopolnog kratkog spoja. Rezultati mjerenja mehaničkih učinaka struje kratkoga spoja su uspoređeni s rezultatima proračuna pomoću programa KSUSAB.



Slika 2 Ispitni poligon za ispitivanje utjecaja kratkoga spoja na užetne sabirnice [2]

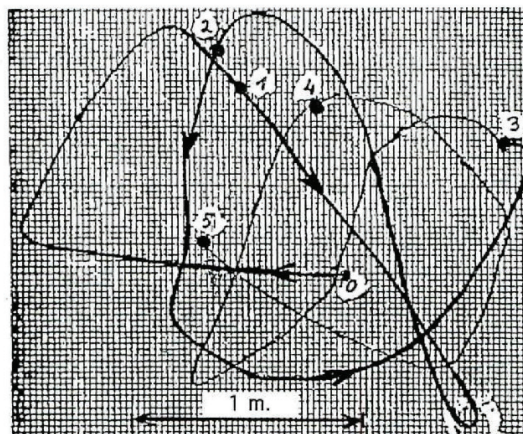
Figure 2 Test site for testing the effect of short circuit on strain busbars [2]



Slika 3 Izmjerena sila u zapadnom vodiču [2]

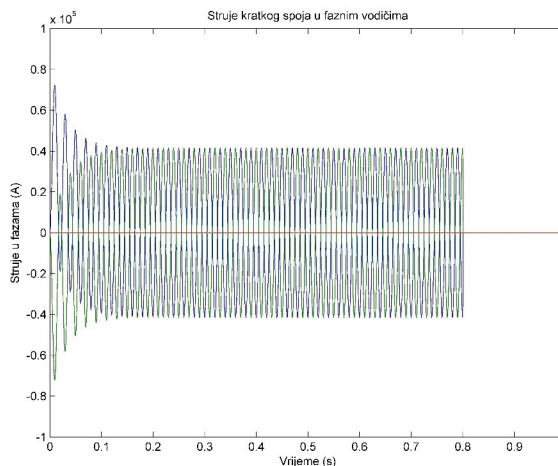
Figure 3 Measured force in the western conductor [2]

Rezultati proračuna pomoću programa KSUSAB su prikazani na slikama 5 do 7.



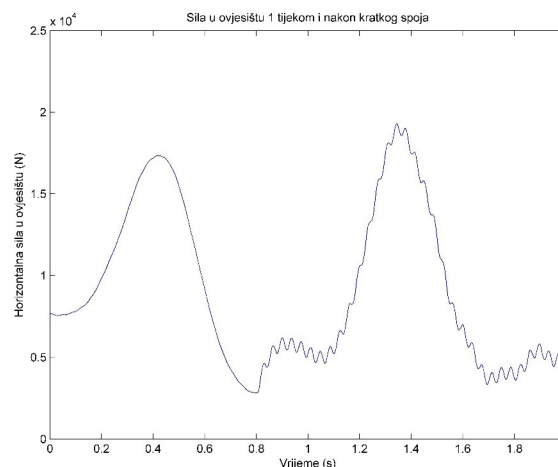
Slika 4 Detaljni prikaz izmjenog otklona zapadnog vodiča tijekom 5 sekundi [2]

Figure 4 Detailed display of the measured swing of the western conductor over 5 seconds [2]



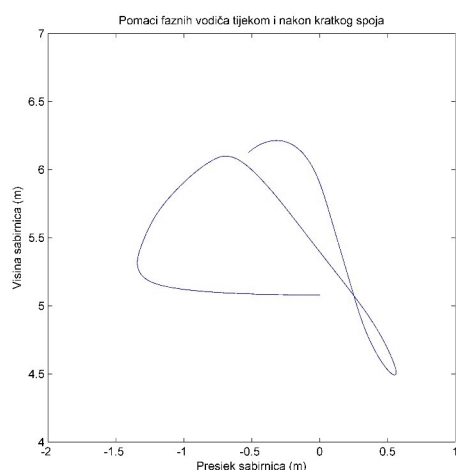
Slika 5 Oscilogram struje dvopolnog kratkoga spoja

Figure 5 Two-pole short-circuit current oscillogram



Slika 6 Izračunata sila u zapadnom vodiču

Figure 6 Calculated force in a western conductor



Slika 7 Izračunati otklon zapadnog vodiča tijekom 2 s

Figure 7 Calculated the deflection of the western conductor during 2 s

Usporedba rezultata mjerenja i programa KSUSAB je prikazana u tablici 1. Uspoređeni su rezultati u zapadnom vodiču.

Usporedba rezultata mjerenja i proračuna daju slijedeće podudarnosti u slijedećim veličinama: vrijeme nastanka prva dva maksimuma sile (otklon vodiča prilikom kratkoga spoja i pad vodiča nakon kratkoga spoja), izgled krivulje sile u vodiču, izgled krivulja otklona vodiča, te vanjski i unutarnji otklon vodiča.

Mogući razlog odstupanja u proračunu sila (oko 10 %) je građa izolatorskog lanca. U ispitnom modelu spoj vodiča se vrši putem spojnog elementa (duljine 1,40 m i mase 8 kg) i izolatorskog lanca (duljine 1,54 m i mase 52,3 kg), a u programu KSUSAB se koristio izolatorski lanac ukupne duljine 2,94 m i mase 60,3 kg.

Tablica 1. Usporedba rezultata mjerenja i proračuna pomoću programa KSUSAB

Table 1. Comparison of measurement results and calculations using the KSUSAB program

Veličina	Mjerenje	KSUSAB	Odstupanje (%)
Maksimalna sila u vodiču za vrijeme kratkoga spoja (N)	16000	17000	+6,25
Trenutak maksimalne sile (s)	0,47	0,45	+4,44
Maksimalna sila u vodiču prilikom pada vodiča (N)	22000	19500	-11,34
Trenutak maksimalne sile (s)	1,39	1,38	+0,72
Otklon vodiča prema van (m)	-1,430	-1,342	+6,55
Otklon vodiča prema unutra (m)	0,556	0,564	-1,42

Također u proračunu pomoću programa KSUSAB nisu modelirani otcjepi na potporne izolatore kao vodiče već samo modelirani samo kao dodatne mase.

5. ANALIZA POMOĆU PROGRAMA KSUSAB

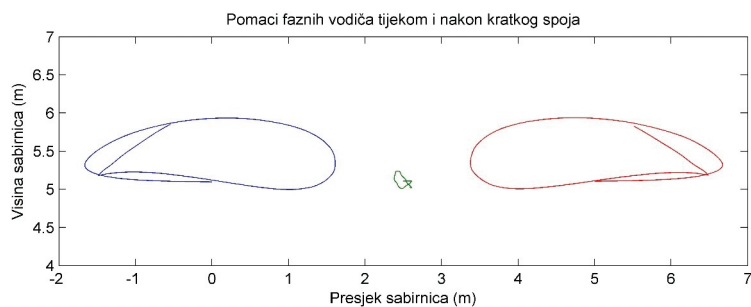
5. ANALYSIS USING THE PROGRAM KSUSAB

Analiza primjene programa KSUSAB je izvršena na test primjeru sabirničkog sustava s jednostrukim aluminijskim vodičem 800 mm² i dvostrukim zateznim izolatorom. Na sabirnički sustav su spojena 4 polja s otcjepnim stezaljkama i otcjepnim aluminijskim vodičem 400 mm² duljine 4 m. Otcjepni vodiču su priključeni na razmaku 2 m. Detaljni podaci test sabirničkog sustava su prikazani u doktorskom radu [7].

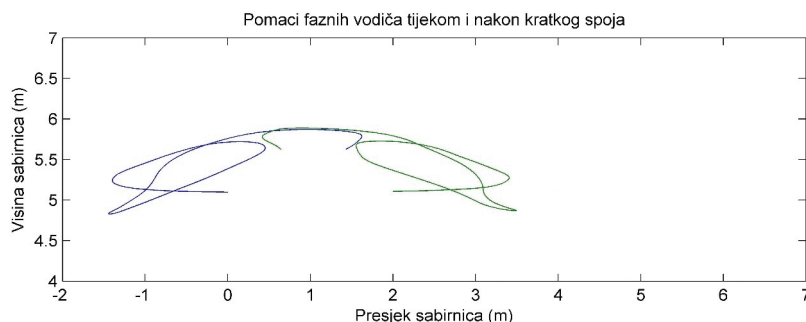
Izvršena je analiza rezultata proračuna u ovisnosti o iznosu struje kratkoga spoja, njenom trajanju i vrsti kratkoga spoja (2p ili 3p), postojanja APU i vjetra.

Numerički rezultati su prikazani u tablici 2, a grafički prikaz otklona središta raspona vodiča za 3 zanimljiva slučaja su prikazani na slikama 8, 9 i 10.

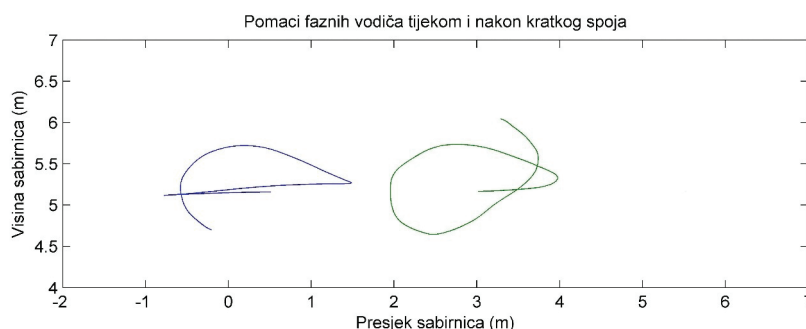
Na slici 10 je vidljivo da je početno stanje središta raspona uslijed vjetra otklonjeno za približno pola metra u desno i malo podignuto.



Slika 8 Otkloni faznih vodiča za Slučaj 6
Figure 8 Deflection of phase conductors for Case 6



Slika 9 Otkloni faznih vodiča za Slučaj 7
Figure 9 Deflection of phase conductors for Case 7



Slika 10 Otkloni faznih vodiča za Slučaj 8
Figure 10 Deflection of phase conductors for Case 8

Tablica 2. Rezultati analize primjenom programa KSUSAB

Table 2. Results of the analysis using the KSUSAB program

R. br.	Tip k.s.	I_{3ks}'' (kA)	t_{ks} (s)	a (m)	Ostalo	F_{max} L1 (N)	Otklon L1 lijevo (m)	Otklon L1 desno (m)
1	2p	20	0,5	2,50	-	8.805	0,76	0,69
2	2p	20	0,5	2,00	-	9.447	0,97	0,83
3	2p	34	0,1	2,50	-	8.812	0,79	0,71
4	2p	34	0,2	2,50	-	10.529	1,21	1,14
5	2p	34	0,5	2,50	-	13.050	1,57	1,54
6	3p	34	0,5	2,50	-	13.834	1,69	1,62
7	2p	34	0,2	2,50	APU (0,8-1,0 s)	14.692	1,43	1,64
8	2p	34	0,2	2,50	600 N/m ²	12.510	0,79	1,50

Grafički prikazi pomaka faznih vodiča pri automatskom ponovnom uklopu (Slučaj 7) ukazuju na potrebu detaljnog razmatranja tih prilika pri projektiranju užetnih sabirnica zbog mogućeg sudara vodiča.

Grafički prikazi pomaka faznih vodiča pri vjetru (Slučaj 8) ukazuju na potrebu detaljnog razmatranja tih prilika pri projektiranju užetnih sabirnica zbog mogućeg sudara vodiča.

Rezultati proračuna prikazani u tablici 2 imaju očekivane vrijednosti. Dulje trajanje kratkoga spoja daje veće sile u vodičima i veće otklone vodiča (primjer vodič u fazi L1). Povećanje struje kratkoga spoja daje veće sile u vodičima i veće otklone vodiča (primjer vodič u fazi L1). Zbog relativno laganog vodiča (aluminij 800 mm²) pri većim strujama kratkoga spoja dolazi do sudaranja vodiča susjednih faza pri dvopolnom kratkom spoju.

6. ZAKLJUČAK

6. CONCLUSION

U ovom radu opisan je program KSUSAB za proračun mehaničkih učinaka struje kratkoga spoja na užetne sabirnice. Program KSUSAB je izrađen u programskom paketu MATLAB i koristi njegove rutine za proračun sustava nelinearnih jednadžbi i proračun sustava diferencijalnih jednadžbi. Program KSUSAB je verificiran usporedbom s publiciranim rezultatima ispitivanja kratkog spoja u certificiranom laboratoriju.

Na kraju su prikazani rezultati primjene programa KSUSAB na nekoliko varijanti užetnih sabirnica (razmak faza, struja kratkoga spoja, trajanje kratkoga spoja, tip kratkoga spoja, APU i bočni vjetar).

Pomoću programa KSUSAB, za razliku od metoda prezentiranim u međunarodnim normama, moguće je proračunavati sustave užetnih sabirnica u nestandardnim uvjetima (vjetar, nepravilna geometrija sabirnica,...).

Nastavak istraživanja treba uključiti užetne sabirnice sa snopom vodiča i točnije modeliranje otcjepa.

7. REFERENCE

7. REFERENCES

- [1.] CIGRE, SC 23 (Substations), WG 23-11 (Substations and Environment), ESCC Task Force (Effects of Short-Circuit Currents), "The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (rigid and Flexible Bus-Bars)", Volume 1, An Updated Revision of CIGRE Brochure of 1987, CIGRE, Paris, France, 1996.
- [2.] CIGRE, SC 23 (Substations), WG 23-11 (Substations and Environment), ESCC Task Force (Effects of Short-Circuit Currents), "The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (rigid and Flexible Bus-Bars)", Volume 2, Data Base of Reference Tests, CIGRE, Paris, France, 1996.
- [3.] Petranović, D., "Mehanički učinci struje kratkog spoja u rasklopnim postrojenjima s užetnim sabirnicama", Zbornik radova 7. Conference HO CIGRE, Cavtat, Hrvatska, 2005., Ref. B3-06.
- [4.] "MATLAB – User's Guide", Ver. 2009, The MathWorks Inc., Natick, MA, USA, 2009.
- [5.] Keffer, D., "Advanced Numerical Techniques for the Solution of Single Nonlinear Algebraic Equations and Systems of Nonlinear Algebraic Equations", ChE 505, University of Tennessee, May 1999.
- [6.] Ashino, R., Nagase, M., Vaillancourt, R., "Behind and Beyond the MATLAB ODE Suite", Computers & Mathematics with Applications, Vol. 40, Issues 4–5, August–September 2000, str. 491–512. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(00\)00175-9](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(00)00175-9)
- [7.] Petranović, D.: Mehanički učinci struja kratkoga spoja na sustav užetnih sabirnica, doktorska disertacija, FER, Zagreb, 2019. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:103985>

AUTOR · AUTHOR**• Davor Petranović**

Viši predavač na Tehničkom Veleučilištu u Zagrebu skoro 30 godina. Preko 39 godina je radio kao istraživač i projektant u nekoliko vodećih hrvatskih tvrtki. Razvio je više programa

za projektiranje transformatorskih stanica i dalekovoda. Autor je više od 60 znanstvenih i stručnih radova. Mentorirao je stotinjak završnih i diplomskih radova. Oženjen i otac dvoje djece. Hobbiji su putovanja i programiranje.

He is a part time senior lecturer at The Polytechnic of Zagreb for almost 30 years. Over 39 years he works as researcher and designer of substation in several leading Croatian companies. He has developed many computer programs for substation and transmission lines design. He is author of more than 60 of scientific and professional papers. Married, two child. Hobbies: travel and software development.

Korespondencija · Correspondence

dpetrano@tvz.hr