

Željko Ćosić, mag.ing.el.
Ravel d.o.o.
zeljko.cosic@ravel.hr

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

Branimir Đikić, mag.ing.el.
Ravel d.o.o.
branimir.dikic@ravel.hr

UTJECAJ AUTOMATSKOG PONOVOG UKLOPA NA UŽETNE SABIRNICE U VISKOKONAPONSKIM RASKLOPNIM POSTROJENJIMA

SAŽETAK

U skladu sa zahtjevom za skraćenjem vremena bez napona, automatski ponovni uklop se vrlo često koristi za ponovo vraćanje napona na dalekovodima nakon njihova isklopa zbog kvarova u elektroenergetskom sustavu. Prilikom nastanka kvara u sustavu struje kratkog spoja protječu sabirnicama visokonaponskih rasklopnih postrojenja i uzrokuju naprezanja užetnih sabirnica i ostalih elemenata postrojenja. Izrazito nepovoljan slučaj u svezi mehaničkih naprezanja sabirnica jest kada kvar na dalekovodnim poljima nije prolazan (početni ili prvi kvar) te automatskim ponovnim uklopom struje kvara počnu ponovo protjecati sabirničkim sustavom rasklopnog postrojenja (drugi kvar). U slučaju neuspješnog automatskog ponovnog uklopa struje drugog kratkog spoja mogu uzrokovati značajna naprezanja s obzirom da one mogu početi protjecati prije prigušenja konstrukcije uslijed dinamičke pobude prvog (početnog) kvara. Kroz rad će se opisati i analizirati takva pojava te dati osvrt na ispitivanja koja su provedena prema dostupnoj literaturi.

Ključne riječi: struja kratkog spoja, naprezanje, automatski ponovni uklop, sabirnički sustav, užetne sabirnice

AUTOMATIC RECLOSURE INFLUENCE ON FLEXIBLE BUSBARS IN HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS

SUMMARY

Automatic reclosures of overhead transmission line circuit breakers, after they have been tripped because of fault in electrical system, are frequently used due to demand of short time without voltage. During that fault short circuit currents are flowing through station busbars causing mechanical stress of equipment including busbars. One of worst cases in regard to mechanical stress is when fault in electrical system is not temporary (first fault) and after automatic reclosure second fault happens causing short circuit currents flowing again through stations busbars. Mechanical stress caused by second fault currents can be higher rate because those currents can start flowing before construction attenuation due dynamic excitation of first fault. In this article this phenomena will be described and analyzed including review of test results given in procurable literature.

Key words: short-circuit current, mechanical stress, automatic reclosing, busbar system, flexible busbars

1. UVOD

Kvarovi u elektroenergetskom sustavu dijele se prema trajanju i posljedicama na:

- a) Privremene kvarove koji spontano nestaju. Takvi kvarovi su najčešći u mrežama sa izoliranim zvjezdištem u kojima se može luk sam ugaziti pri jednopolnom kratkom spoju.
- b) Prolazne kvarove koji nastaju na nadzemnim vodovima i koji se isklapanjem i ponovnim uklapanjem prekidača eliminiraju.
- c) Trajne kvarove koji zahtijevaju isključenje i popravak istog. Nastaju uglavnom na unutrašnjoj izolaciji, pri probouju izolacije kabela, aparata ili čvrste izolacije unutar izolatora.

Najveći broj svih kvarova u mrežama s nadzemnim vodovima ima prolaznu prirodu. Od svih kvarova preko 90 % čine jednopolni kvarovi. Svaki prolazni jednopolni kvar u mreži sa uzemljenom neutralnom točkom uzrokuje protjecanje velike struje kratkog spoja kroz mjesto kvara. Ako se kvar u mreži sa uzemljenim zvjezdištem uspostavio preko luka, luk se ne može sam od sebe ugaziti. Rješenje kako bi se luk eliminirao i kako bi sustav mogao nesmetano raditi je isključenje i ponovno uključivanje prekidača.

Prilikom višepolnog ponovnog uklopa u visokonaponskim postrojenjima s užetnim sabirnicama izmjerena su znatna povećanja naprežanja u odnosu na slučaj bez ponovnog uklopa. Jednopolni kvarovi (zbog velikih razmaka između vodiča pod naponom i uzemljenih dijelova) izazivaju znatno manja naprežanja nego višepolni kvarovi. Zbog toga se povećanje naprežanja uslijed jednopolnih ponovnih uklopa može zanemariti.

Kao parametri koji utječu na povećanje naprežanja ističu se:

- a) Trajanje prvog protjecanja struje koje određuje stanje mehaničkog sustava u trenutku prekidanja struje, a time i slobodno titranje vodiča koji slijedi.
- b) Trajanje vremenske pauze kojom je određeno stanje mehaničkog sustava u trenutku nastupa ponovnog uklopa.
- c) Trenutne vrijednosti napona trofaznog sustava za vrijeme trajanja vremenske pauze kojom je određeno stanje mehaničkog sustava u trenutku nastanka kratkog spoja i u trenutku nastupa ponovnog uklopa.

Rezultati brojnih ispitivanja, od kojih su neka navedena u daljnjem tekstu, pokazuju da su najnepovoljniji slučajevi kada se automatski ponovni uklop događa prije prigušenja dinamičke pojave uslijed prvog protjecanja struje kvara. Treba naglasiti da vremena protjecanja struje kratkog spoja (prvo i drugo protjecanje struje kvara) kao i vrijeme između ta dva protjecanja mogu znatno varirati. Najnepovoljniji slučaj (maksimalno naprežanje) se može dogoditi ako je vrijeme prvog protjecanja struje kratkog spoja jednako 1/4 perioda mehaničke frekvencije i ako je vrijeme između prvog i drugog protjecanja struje kratkog spoja jednako periodu mehaničke frekvencije pri čemu slijedi drugo protjecanje struje kratkog spoja jednako 1/4 perioda mehaničke frekvencije.

2. UTJECAJ AUTOMATSKOG PONOVOG UKLOPA NA NAPREŽANJA

2.1 Zahtjevi i norme

Kako je već u prethodnom tekstu navedeno automatski ponovni uklop je česta radnja koja se poduzima kako bi se omogućila što manja beznaponska pauza na dalekovodima. Ciklus ponovnog uklopa se može opisati s vremenima: $T_{k1} / T_i / T_{k2}$ gdje je T_{k1} trajanje prvog protjecanja struje kratkog spoja, T_i je interval ponovnog uklopa (vrijeme bez napona) i T_{k2} je vrijeme drugog protjecanja struje kratkog spoja. Naprimjer u RTE visokonaponskoj mreži, iznosi ciklusa ponovnog uklopa uobičajeno iznose 120ms/2 do 5s/90ms za 400 kV mrežu odnosno 210ms/2 do 5s/150ms za 220 kV mrežu zavisno o uređajima relejne zaštite. Ali često se koristi brzi ponovni uklop za skraćivanje intervala ponovnog uklopa T_i ($T_i = 300$ ms) za mreže naponske razine 90 kV i 63 kV.

Ukoliko se kvar održi, naprežanja mogu biti veća nego prije, odnosno uslijed protjecanja struja prvog kratkog spoja. Proračuni utjecaja neuspješnog automatskog ponovnog uklopa često zahtijevaju korištenje računala sa programima koji koriste metodu konačnih elemenata. U normi IEC 60865 predočena je pojednostavljena metoda proračuna zatezne sile za vrijeme ili nakon kratkog spoja za najjednostavnija dispozicijska rješenja sa ili bez „pinch” efekta. Ali se tada ne uzima u obzir ponovni uklop.

Upravo slučaj neuspješnog automatskog ponovnog uklopa, koji nije obuhvaćen navednim normama, uzrokuje povećana naprezanja. U Tablici 1, prema [2], prikazani su iznosi sila prema kojima se može zaključiti o razini povećanja naprezanja nakon neuspješnog automatskog ponovnog uklopa.

Tablica 1 Rezultati ispitivanja

Raspon [m]	68	68	34	34
Broj faza	1	2	1	2
Statička zatezna sila [N]	5740	5370	5379	3390
Sila prvog kratkog spoja [N]	10040	8559	9919	7952
Sila prvog propada vodiča [N]	12824	13694	9203	9045
Sila kod drugog kratkog spoja [N]	11432	9968	10532	6660
Sila kod drugog propada vodiča nakon kratkog spoja [N]	21870	22051	8181	9146

2.2 Utjecaj vremena beznaponskog intervala

Ponovni uklop djeluje na nosivu konstrukciju koja je već u gibanju zbog početnog kvara i ovisno o mjestu drugog kvara s užetima koja su u stadiju akceleracije ili deceleracije (porast do prvog propada, propad), utječe na mehanička i geometrijska naprezanja koja se razlikuju na sljedeći način: utjecaj ponovnog uklopa se kombinira s djelovanjem početnog (primarnog) kvara, povećava se naprezanje, ili se ti utjecaji suprotstavljaju otklonu vodiča zbog početnog kvara i tako dolazi do smanjenja sila, doprinoseći prigušenju njihanja.

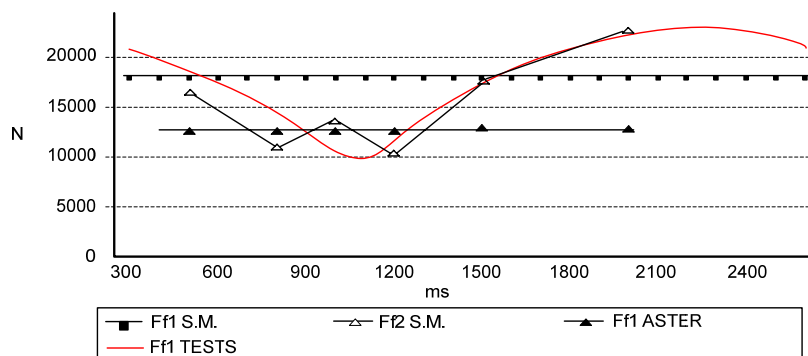
Mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Ponovni uklop može prouzrokovati veće sile nego u slučaju kada ga nema. To je hipoteza koju sadržava i IEC 60865 za krute vodiče.
- Manji broj kvarova koji se događaju kod ponovnog uklopa vodi ka silama koje premašuju sile kod početnog kvara.
- Interval automatskog uklopa (T_i) omogućuje konstrukciji da priguši oscilacije prije nego se dogodi ponovni uklop i tako doprinosi smanjenju maksimalnih sila koje postoje kod ponovnog uklopa.

Poznavanje trenutka ponovnog uklopa kod koga je najveće naprezanje od posebnog je značenja kako bi se sabirnički sustav, ali i ostale komponente postrojenja, ispravno dimenzionirale. Optimalna sila propada nakon ponovnog uklopa se događa neznatno nakon trenutka kada je udaljenost između vodiča minimalna u sredini raspona. Prema [2], najveće vrijednosti sila za vrijeme sekundarnog kratkog spoja se događa neznatno nakon trenutka kada udaljenost između vodiča u sredini raspona prelazi udaljenost u normalnom položaju.

Slika 1 prikazuje, za raspon dužine 68 m, sile propada u odnosu na interval ponovnog uklopa (T_i) uz sljedeće značenje oznaka:

- S.M. = Pojednostavljena metoda proračuna ;
 ASTER = EDF software;
 TESTS = EDF ispitivanja;
 F_{f1} = sila propada kada nema ponovnog uklopa;
 F_{f2} = sila propada s ponovnim uklopom.



Slika 1 Sila propada (N) i vrijeme beznaponske pauze (ms)

Najnepovoljniji slučaj se događa kada je interval ponovnog uklopa u sljedećem području:

$$T_{k1} + T_i < 0,25 T^\circ \quad (1)$$

$$0,75 T^\circ < T_{k1} + T_i < 1,25 T^\circ \quad (2)$$

Pri tome je:

$$T^\circ = \frac{2\pi \sqrt{\frac{0,8 b_c}{g}}}{1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_M}{90} \right)} \quad (3)$$

period gibanja između kvarova (bez struje), δ_M koji je maksimalni kut otklona u stupnjevima te b_c dinamički provjes vodiča na sredini.

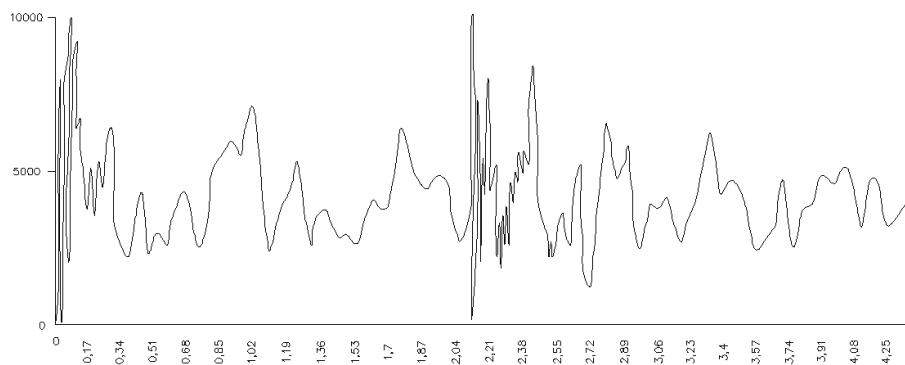
Maksimum sile F_{f2} se događa kada je interval ponovnog uklopa između $0,75 \cdot T^\circ$ i T° te kada je interval ponovnog uklopa između T° i $1,25 \cdot T^\circ$.

Za proračun maksimalnih sila nakon T° novnog uklopa u sustavima bez vodiča u snopu, IEC 60865 norma može se primjeniti s vremenom čišćenja kvara jednakim $T_K = T_{k1} + T_{k2}$. Ukoliko se želi detaljnija analiza intervala ponovnog uklopa, pojednostavljena metoda prema [2] se može koristiti, međutim samo u jednostavnim slučajevima.

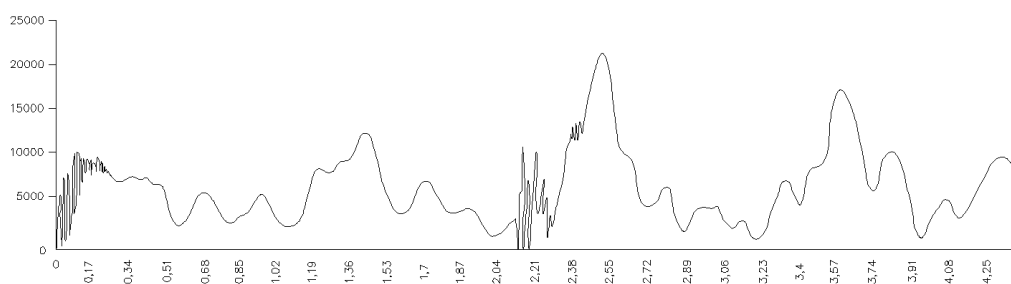
3. OSVRT NA ISPITIVANJA PREMA DOSTUPNOJ LITERaturi

3.1. Ispitivanje i proračuni zateznih sila

Ispitivanja prema [2] koja su provedena u Francuskoj, EDF razmatraju konfiguracije sa rasponima 34 m odnosno 68 m koristeći uže nazivnog presjeka 570 mm^2 po fazi. Primjenjeni ciklus automatskog ponovnog uklopa je 85 ms/2 s/95 ms. Razlika zateznih sila između dviju faza (Tablica 1) nastaje zbog više uzroka: statička zatezna sila, krutosti portala (razlike između sredine i krajeva portala), različita gibanja u vremenu. Nakon drugog kratkog spoja, maksimalna sila kratkog spoja u fazi L1 za raspon dužine 68 m je povećana za 13 % (16 % za fazu L2), a sila propada vodiča za 70 % (61 % za fazu L2.). Na slikama 2 i 3 prikazani su vremenski zapisi zateznih sila za različite raspone.



Slika 2. Iznosi zatezne sile (N) u ovisnosti o vremenu (s) - raspon 34 m - faza L1



Slika 3. Iznosi zatezne sile (N) u ovisnosti o vremenu (s) - raspon 68 m - faza L1

Prema navedenoj literaturi provedeni su i proračuni kako bi se rezultati usporedili sa rezultatima ispitivanja. Ulazni podaci za proračun su isti kao što su navedeni za ispitivanje (uže, vremenski intervali i rasponi). Pri tome je primjenjen dvopolni kratki spoj $I_{k2} = 30$ kA i vremenska konstanta 81 ms. Uz razmak između simetrala faza $a = 4,75$ m i jediničnu masu užeta $ms' = 1,574$ kg/m provjes u sredini raspona kod 45°C iznosi 3% što odgovara statičkoj sili zatezanja $F_{st} = 5740$ N za raspon $l = 68$ m. Proračunom su dobijena zatezna sila drugog kvara od 9 676 N, odnosno sila propada drugog kvara od 22 469 N.

Uz proračun predložen od strane autora, proveden je i proračun prema IEC 60865 koji za slučaj sa automatskim ponovnim uklopom koristi metodu kao za slučaj bez njega s tim da se za vrijeme trajanja kvara koristi zbroj vremena prvog i drugo kvara odnosno:

$$T_k = T_{k1} + T_{k2} \quad (4)$$

Proračunom za prvi kvar su dobijeni rezultati sila $F_{t1} = 8060$ N i $F_{f1} = 18083$ N. Nakon primjene spomenute promjene trajanja vremena kvara ($T_k = 0,175$ s) dobijeni su rezultati sila drugog kvara $F_{t2} = 13816$ N i $F_{f2} = 24235$ N.

Rezultati ispitivanja i rezultati proračuna radi lakše usporedbe prikazani su u sljedećoj tablici pri čemu je sila F_{t2} zatezna sila drugog kvara, a F_{f2} sila pri propadu vodiča drugog kvara.

Tablica 2 Usporedba rezultata ispitivanja i proračuna za slučaj sa rasponom 68 m

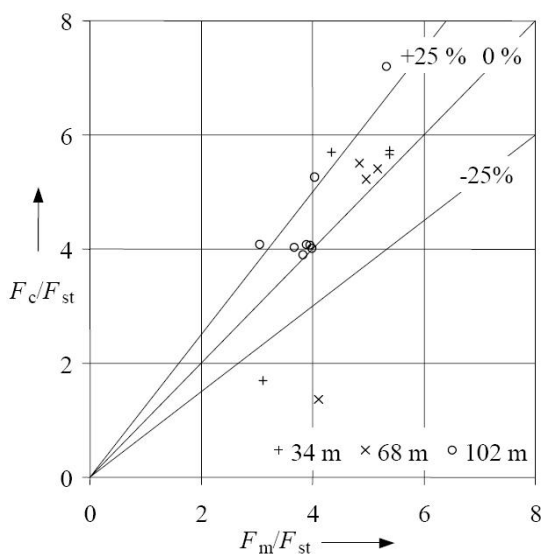
Sile	Maksimalne sile zatezanja		
	Ispitivanje	Proračun prema [2]	Proračun prema IEC 60865
F_{t2} (N)	11 432	9 676	13 816
F_{f2} (N)	22 051	22 469	24 235

3.2. Usporedba izmjerenih i izračunatih vrijednosti sila

Ispitivanja utjecaja trolnog automatskog ponovnog uklopa na sabirničke sustave s užetnim vodičima provedena prema [2]. U daljnjem tekstu pozornost je posvećena ispitivanju utjecaja trolnog automatskog ponovnog uklopa.

Ispitivanja su izvedena na tri različita raspona duljina 34 m, 68 m i 102 m. Iako je u određenim normama dužina raspona ograničena na manje od 60 m, može se zaključiti iz rezultata ispitivanja, da se metode proračuna mogu primjenjivati i za duljine veće 60 m jer rezultati ispitivanja ne odstupaju značajno od rezultata proračuna.

Na slici 4 prikazani su rezultati ispitivanja (slučajevi 9, 10 i 11 prema [2]) sila kratkog spoja za raspone duljina 34m (4 ispitivanja), 68m (4 ispitivanja) i 102m (8 ispitivanja). Pri tome su F_c izračunata sila, a F_m sila dobijena mjerenjima, a na grafu su prikazani omjeri u odnosu na statičku silu F_{st} .



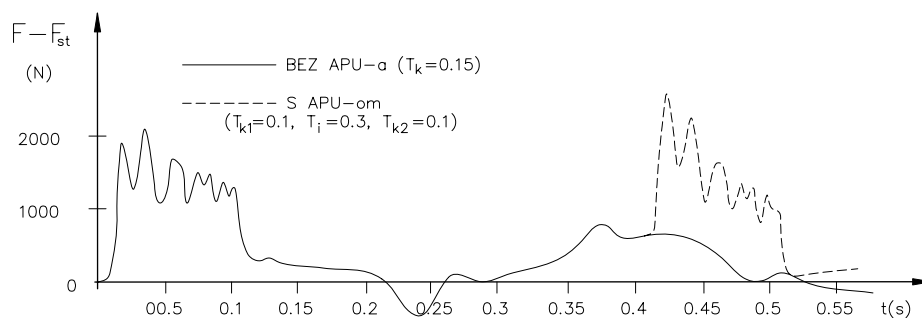
Slika 4. Prikaz komponenta rezultantne sile kratkog spoja prema [2]

Na prikazanom dijagramu označene su pomoćne linije sa oznakama -25%, 0%, 25 % što označava odgovarajuća odstupanja iznosa proračunate sile u odnosu na iznos izmjerene sile.

Posebnu pažnju treba posvetiti rezultatima ispitivanja ispod linije - 25 % koja prikazuje rezultate ispitivanja za trolni automatski ponovni uklop. Proračuni prema normama daju kao rezultat sile koje su premalene jer takav slučaj nije odgovarajuće obrađen, ali uzimajući u proračun zbroj vremena prvog i drugog kratkog spoja, prema formuli (4) kao stvarno vrijeme djelovanja kratkog spoja, tada rezultati mjerenja pokazuju izvrsno podudaranje s rezultatima proračuna (područje uz liniju 0 %).

3.3. Utjecaj APU-a na povećanje napreznja

Prema [2] analiziran je utjecaj neuspješnog automatskog ponovnog uklopa u konfiguraciji gdje su se koristila dva užeta nazivnog presjeka 587 mm² po fazi. Raspon užeta je 18 m, provjes 0,2 m, struja kratkog spoja 44 kA, vršna struja kratkog spoja 100 kA, statička sila po užetu 7,5 kN. Ispitivanjima i analizom zaključeno je da zagrijavanje užeta uslijed kratkog spoja nema utjecaja na silu F_{pi} (sila „pintch“ efekta) jer je povećanje temperature zanemarivo prije maksimuma sile zatezanja. Vrijeme trajanja kratkog spoja T_{k1} općenito nema utjecaja na sile uslijed dodira vodiča u snopu jer se maksimum sile događa prije T_{k1} . Automatski ponovni uklop uzrokuje iste posljedice kao i prvo protjecanje struje kratkog spoja, ali se ipak utjecaj automatskog ponovnog uklopa kod vodiča u snopu i pripadne sile F_{pi} mora superponirati silama uslijed međufaznog djelovanja kako bi se dobile ukupne sile zatezanja po fazama. To znači da podudaranje pojave neuspješnog automatskog ponovnog uklopa s maksimalnim vrijednostima sila uslijed otklona vodiča ili propada vodiča može uzrokovati značajno povećanje napreznja dijelova sabirničkog sustava, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Sila zatezanja u snopu vodiča ACSR 2x587mm²

Općenito sve navedeno vrijedi i u slučaju podraspona kao i za čitavi raspon. I tada se vrši superpozicija sa silama između faza. U ponekim slučajevima nejednake duljine podraspona mogu uzrokovati dodatne utjecaje.

4. ZAKLJUČAK

Posljedica neuspješnog višepolnog ponovnog uklopa u visokonaponskim postrojenjima s užetnim vodičima može biti uzrok nastajanju velikih povećanja dinamičkih naprezanja u odnosu slučajevima u kojima nije predviđen ponovni uklop. Na temelju proučavanja pojedinih parametara, a i prema dostupnim rezultatima ispitivanja koja su prikazana kroz rad, može se zaključiti da je vjerojatnost nastanka visokih naprezanja u tom slučaju vrlo velika. Također se može zaključiti da su najnepovoljniji slučajevi kada se dogode trolpolni kratki spojevi. S obzirom da odgovarajuća norma [6] daje dosta pojednostavljenu metodu za proračun sila u slučaju neuspješnog ponovnog uklopa koja zna odstupati značajno od izmjerenih vrijednosti potrebno je ovoj problematici posvetiti posebnu pozornost prilikom projektiranja i izvedbe postrojenja.

8. LITERATURA

- [1] Gröber, R., Stein, N.: Beitrag zur dynamischen Kurzschlussbeanspruchung in Schaltanlagen, ETZ-A, 1976.
- [2] The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations, CIGRE W602 (Effects of high currents) of SC 23 (Substations), Paris, 1987.
- [3] Deter, O., Lehman, W., Rameil, W., Stein, N., Terhorst, A.: Influence of Very High Load and Short-circuit Currents on Outdoor Substation Design for the Highest System Voltages of the German Interconnected Grid, CIGRÉ 1976.
- [4] Hoseman, G., Tsanakas, D.: Calculated and Measured Values of Dynamic Short-circuit Stresses in High-Voltage Test Structure with and without Reclosure, Electra, No. 63, 1979.
- [5] Ravlić, V.: Cijevne sabirnice u visokonaponskim postrojenjima, Kigen/Ravel, Zagreb, 2006.
- [6] IEC 60865-1: Short-circuit currents – Calculations on effects. Part 1: Definitions and calculations method, Geneva, IEC, 1993.
- [7] EN 60865-1: Short-circuit currents – Calculations on effects. Part 1: Definitions and calculations method, Brussels, CENELEC, 1993.