

## UTJECAJ SPOJEVA NA APARATE RASKLOPNOG POSTROJENJA USLJED DJELOVANJA POTRESA

## INTERACTION BETWEEN CONNECTIONS AND SUBSTATION EQUIPEMENT SUBJECTED TO EARTHQUAKE

Željko Ćosić, mag.ing.el.  
RAVEL, d.o.o.

Branimir Đikić, mag.ing.el.  
RAVEL, d.o.o.

Velimir Ravlič, dipl.ing.el.  
RAVEL, d.o.o.

Zagreb - Republika Hrvatska

**Sažetak:** Kroz rad će se obraditi problematika međusobnog mehaničkog utjecaja pojedinih visokonaponskih sklopnih aparata vanjske izvedbe i spojeva koji može nastati uslijed djelovanja potresa. Pozornost je usmjerena na utjecaj spojeva koji zbog svojih nelinearnih svojstava mogu bitno utjecati na povećanje pomaka i mehaničkih naprezanja aparata. Dati će se pregled dosadašnjih saznanja u navedenom području te određene upute i smjernice za projektiranje postrojenja prema IEEE normama.

**Ključne riječi:** visokonaponska postrojenja, potres, mehanička naprezanja, dinamika aparata

**Abstract:** This paper presents approach to investigate the significance of dynamic behavior between electrical equipment and connections subjected to earthquake. Nonlinearity of connections can cause significant increase of equipment displacements and mechanical stresses. Through the paper various analytical methods will be presented that are in use to predict level of dynamic interaction. Some of IEEE recommendations for proper design of connections made of flexible conductors also will be mentioned.

**Key words:** high voltage equipment, earthquake, mechanical stress, dynamic interaction

### UVOD

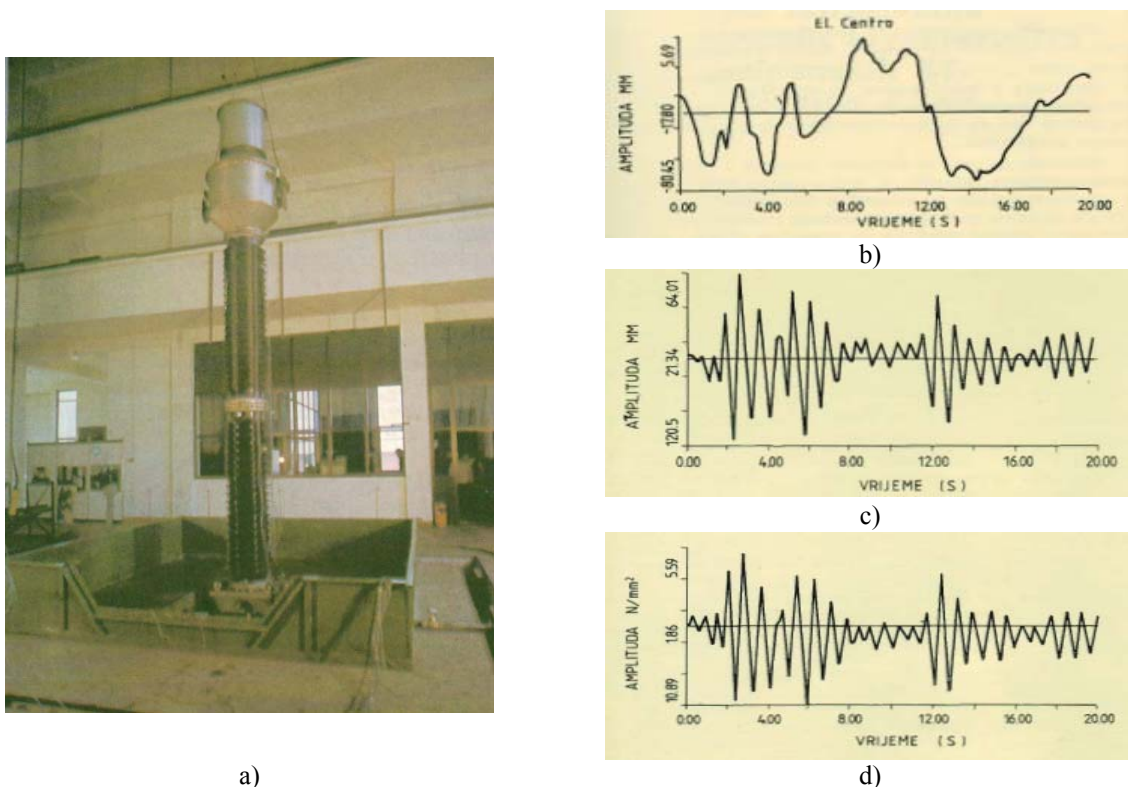
Prilikom projektiranja i izgradnje elektroenergetskih postrojenja bitno je da se pojedini elementi postrojenja odgovarajuće izaberu s obzirom na njihove karakteristike, montiraju te spoje s drugim elementima postrojenjima. Pri tome se posebna pažnja posvećuje termičkoj opteretivosti elemenata, naprezanjima uslijed struja kratkog spoja, naponskim razmacima, ali i naprezanjima uslijed djelovanja potresa. Dosadašnja praksa nije veliku pozornost posvećivala naprezanjima uslijed djelovanja potresa, a pogotovo ne dinamičkom međudjelovanju pojedinih elemenata. Međutim zbog mnogih razloga, a prije svega važnosti prijenosa i distribucije električne energije tijekom i nakon potresa, tom aspektu istraživanja i projektiranja se pridodaje sve veća pozornost.

Prema određenim istraživanjima i izvještajima o uzrocima šteta nakon potresa zaključeno je da spojevi između aparata koji su izvedeni fleksibilnim i krutim spojnicama pridonose mehaničkim naprezanjima samih aparata koji su spojeni na njih. Primjer je slučaj potresa u Miyagi [1] nakon kojega su vršena dodatna ispitivanja i analize te je zaključeno da je

došlo do oštećenja aparata koji su bili povezani spojevima iz fleksibilnih vodiča iako su pojedinačno deklarirani kao aparati koji bi samostalno mogli izdržati naprezanja uslijed potresa. Iz tih razloga, spojevi između aparata su svrstani kao jedni od glavnih uzroka oštećenja uslijed djelovanja potresa. Izvješća sa sličnih slučajeva prema [1] poput potresa u North Palm Springs-u godine 1986. te potresa u Safuenay-u godine 1988. koji su uzrokovali velika oštećenja u transformatorskim stanicama elektroprivrede Hydro-Quebec potvrdila su te zaključke.

## 1. SEIZMIČKA ISPITIVANJA ELEKTRIČNIH APARATA

Uobičajena praksa je da se pojedini elementi u sklopu tipskih ispitivanja podvrgnu laboratorijskim ispitivanjima mehaničkih naprezanja kakva se mogu očekivati i pri stvarnim potresima. Međutim, pri ispitivanjima električni aparati nisu povezani što predstavlja nerealan slučaj s obzirom na normalno pogonsko stanje kada su aparati međusobno povezani. Razlog tome je što se u dosadašnjoj praksi smatralo da veze između povezanih aparata djeluju samo kao prigušivači te da stoga slučaj nepovezanog električnog aparata predstavlja najnepovoljniji slučaj s obzirom na mehanička naprezanja koja mogu nastati pri takvim ispitivanjima. Taj pristup su opovrgnula mnoga izvješća i analize nakon djelovanja potresa, poput prije spomenutih, koja su upozorila da dinamička interakcija spojeva može značajno povećati naprezanja električnih aparata, pogotovo u slučajevima kada su sami spojevi neodgovarajuće izvedeni. Na slici 1 prikazan je primjer ispitivanja strujnog mjernog transformatora nazivnog napona 400 kV prema [2].



Slika 1 - Ispitivanje visokonaponskog strujnog mjernog transformatora prema [2]

- a) - Strujni mjerni transformator tipa AGU-420 pričvršćen na seizmičku vibro-platfomu
- b) - Pobuda simulirana prilikom ispitivanja
- c) - Odziv modela na pobudu, vremenski zapis pomaka zabilježenog na glavi
- d) - Odziv modela na pobudu, vremenski zapis naprezanja za donji izolator

Ispitivanja električnih aparata na mehanička naprezanja pri potresima, prema dostupnim informacijama, nisu se bitno promijenila. Glavni razlog tome je nemogućnost ispitivanja konfiguracija međusobno spojenih električnih aparata koje su bitno veće od vibracijskih ploča koje simuliraju gibanja karakteristična za potrese poput prikazanih na slici 1, a). Stoga da bi se izbjegla šteta uslijed djelovanja potresa, pored laboratorijskih ispitivanja električnih aparata, potrebno je posebnu pažnju posvetiti načinu njihovog spajanja na mjestu ugradnje, karakteristikama spojnih elemenata te određenim analitičkim metodama predvidjeti moguću razinu dinamičkog međudjelovanja električnih aparata i spojeva između njih.

## 2. ANALITIČKE METODE

Kako bi se odredile moguće razine mehaničkih naprezanja pojedinih električnih aparata uslijed djelovanja potresa potrebno je posvetiti pažnju sljedećim parametrima:

- seizmičkoj kvalifikaciji mjesta ugradnje opreme,
- zahtjevima s obzirom na naponske razmake,
- osnovnoj geometriji električnih aparata i spojeva između njih,
- karakteristikama električnih aparata i spojeva.

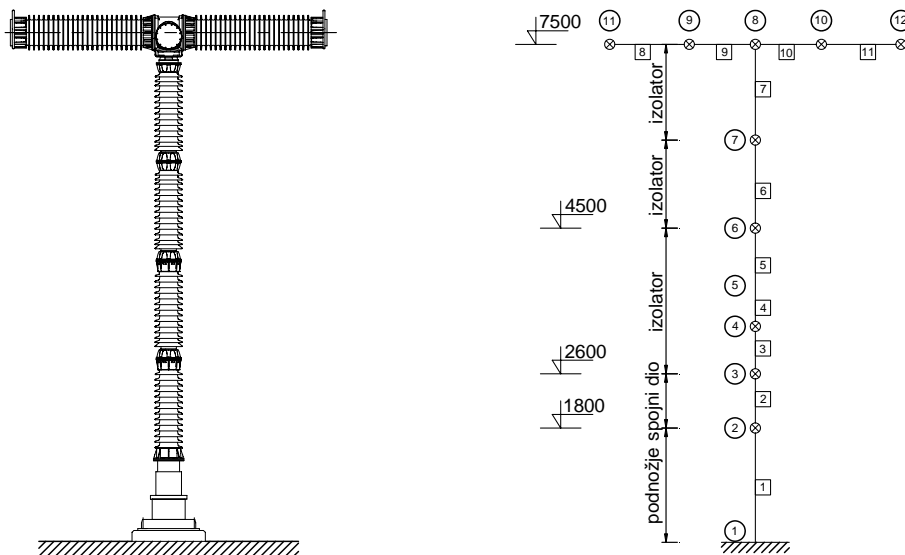
Na temelju gore navedenih podataka može se pristupiti provedbi analitičkih metoda kojima se mogu predvidjeti određena ponašanja električnih aparata i njihovih međudjelovanja sa naglaskom na mehanička naprezanja i pomak aparata uslijed gibanja tla kakva su karakteristična pri djelovanjima potresa.

U tu svrhu se najčešće koriste određeni fizikalni modeli električnih aparata i analitičke metode od kojih su najčešće sljedeće, počevši od jednostavnije prema složenijoj:

- metoda njihala sa jednim stupnjem slobode,
- metoda generaliziranog njihala sa jednim stupnjem slobode,
- metoda njihala sa više stupnjeva slobode,
- metoda konačnih elemenata (eng. finite element method).

Svaka od metoda unosi određene aproksimacije i zanemarenja, a koja od njih će se koristiti ovisi o dostupnim podacima, odnosno fizičkim karakteristikama električnih aparata. Osnovni podaci koji su potrebni za bilo koju od metoda su vlastita frekvencija i prigušenje električnog aparata. Razvojem računala i računalnih programa bitno su napredovale i analitičke metode za koje je potrebno računalo što se poglavito odnosi na metodu konačnih elemenata. Navedena metoda se najčešće koristi prije tipskih ispitivanja pojedinog električnog aparata kada je dostupno relativno mnogo podataka o samom električnom aparatu poput raspodjele mase aparata, karakteristike samih materijala i slično. Rezultati takvih analiza se tada mogu provjeriti stvarnim ispitivanjima u laboratorijskim uvjetima koja su opisana u prijašnjem tekstu i prikazana na slici 1.

Vlastite frekvencije visokonaponskih električnih aparata se nalaze unutar raspona između 1 Hz i 10 Hz. Ukoliko vlastita frekvencija određenog aparata nije određena ispitivanjem, što se preporučuje, ona se može dobiti korištenjem prije spomenutih analitičkih metoda. Na Slici 2 prikazan je model prekidača koji se koristi za proračun vlastitih frekvencija metodom konačnih elemenata prema [3]. Ravnina x određena je simetralom potpornih izolatora i simetralom komora prekidača, dok je ravnina y okomita na ravninu x odnosno na simetralu komora prekidača.



Slika 2 Model prekidača K3AT3-420 kV „Končar“ za proračun vlastite frekvencije

Provedenim proračunom prema [3] u razini polova prekidača dobili su se sljedeći rezultati:

$$f_x = 1,066 \text{ Hz}, T_x = 0,938 \text{ s} \quad (1)$$

$$f_y = 1,118 \text{ Hz}, T_y = 0,894 \text{ s} \quad (2)$$

Pri tome je:

$f_x$  - vlastita frekvencija u x-ravnini;

$T_x$  - trajanje jednog perioda (vlastito vrijeme) u x-ravnini;

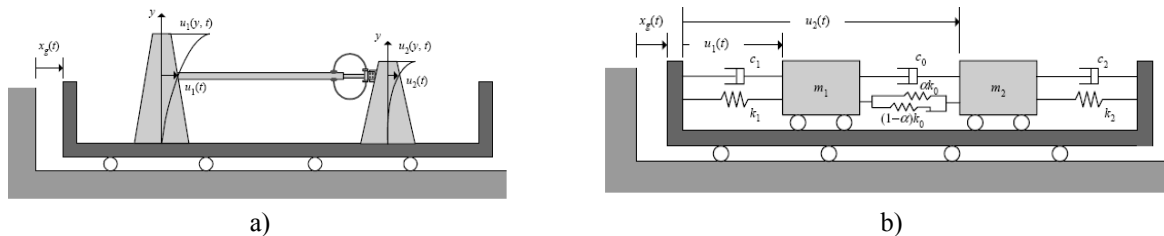
$f_y$  - vlastita frekvencija u y-ravnini;

$T_y$  - trajanje jednog perioda (vlastito vrijeme) u y-ravnini;

### 3. MEĐUDJELOVANJA ELEKTRIČNIH APARATA

U pogonskom stanju električni aparati su vezani pri čemu spojevi mogu biti fleksibilni ili kruti. Pri gibanjima takvih konstrukcija uzrokovanih vanjskim utjecajima poput potresa dolazi do dinamičkog međudjelovanja pojedinih elemenata pri čemu se mehanička naprezanja mogu povećati ili smanjiti.

Za određivanje pomaka električnog aparata štapne izvedbe može se koristiti model u kojemu su pojedini električni elementi prikazani kao njihala sa jednim stupnjem slobode što se koristi kada je dostupno relativno malo fizičkih karakteristika električnih aparata i spojnih elemenata. Na slici 3 prikazan je model konfiguracije koja se sastoji od dva električna aparata međusobno povezana krutom cijevnom vezom.



Slika 3 Model dva električna aparata povezana cijevnom vezom prema [4]

Pri tome je:

$m$  – masa pojedinog elementa,

$k$  – elastičnost,

$c$  – koeficijent prigušenja,

$u(t)$  – pomak elementa na mjestu ovješnja.

Gore prikazani model konfiguracije može se prikazati jednadžbom gibanja:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + R(u, u, z) = -L\ddot{x}_g \quad (3)$$

Pri tome je:

$$u = \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{Bmatrix}, M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_0 \\ -c_0 & c_2 + c_0 \end{bmatrix}, R(u, \dot{u}, z) = \begin{Bmatrix} k_1 u_1(t) - q(\Delta u(t), \Delta \dot{u}(t), z(t)) \\ k_2 u_2(t) - q(\Delta u(t), \Delta \dot{u}(t), z(t)) \end{Bmatrix}, L = \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}$$

..

$\ddot{x}_g$  – ubrzanje tla (temelja električnog aparata).

$u_i(t)$  – pomak i-tog elementa na mjestu ovješnja spojnog elementa,

$\Delta u = u_1(t) - u_2(t)$  – relativni pomak između dva elementa,

$z$  - pomoćna varijabla plastičnosti spojnog elementa,

$m_i, c_i, k_i, l_i$  - efektivna masa, elastičnost, koeficijent prigušenja, vanjska inercijska sila i-tog elementa,

$q(\Delta u(t), \Delta \dot{u}(t), z(t))$  - funkcija sile opiranja neelastičnog spojnog elementa prema pretpostavljenom modelu histereze.

Na temelju gore opisanih fizikalnih modela prema [4] uveden je omjer maksimalnih pomaka električnog aparata kada je vezan spojnim elementom  $u_i(t)$  i pomaka električnog elementa kada je on slobodan, odnosno nije vezan sa drugim elementom  $u_{i0}(t)$ :

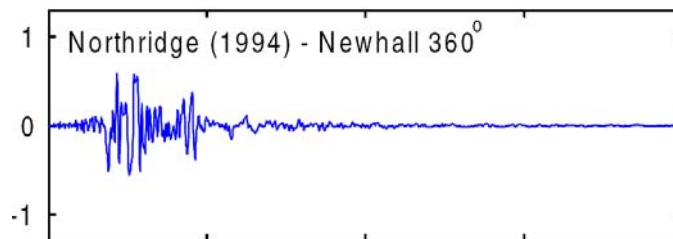
$$R = \frac{\max |u_i(t)|}{\max |u_{i0}(t)|}, i = 1, 2 \quad (4)$$

Korištenjem gore opisane metode može se procijeniti razina mehaničkih naprezanja prilikom određenog gibanja tla karakterističnog za potrese. Dakle, poznavanjem pomaka električnog aparata kada se on promatra kao pojedinačni, nepovezani element i omjerom pomaka definiranog u (4) može se dobiti procjena pomaka tog električnog aparata kada je on dio sustava, odnosno povezan sa drugim električnim aparatima.

Provođenjem analiza na nekoliko slučajeva prema [4], zaključeno je da na spojeni električni aparat koji ima manju vlastitu frekvenciju spojni element djeluje tako da prigušuje njegova gibanja odnosno pomake te je stoga za taj element omjer pomaka R prema (4) manji od 1. Suprotno tome na spojeni električni aparat koji ima veću vlastitu frekvenciju spojni element djeluje tako da povećava njegova gibanja i naprezanja te je stoga njegov omjer pomaka R veći od jedan. Navedeno je prikazano na primjeru koji je proveden prema literaturi [4].

**Tablica 1 Parametri električnih elemenata nazivnog napona 220 kV**

Električni element	m(kg)	k (N/m)	l (kg)	f (Hz)
Potporni izolator	236	2,84x10e5	406	5,52
Rastavljač	661	2,00x10e7	1131	27,7



Slika 4 Oscilogram korišten pri analizi pomaka električnih elemenata prema [4]

**Tablica 2 Omjeri pomaka električnih elemenata**

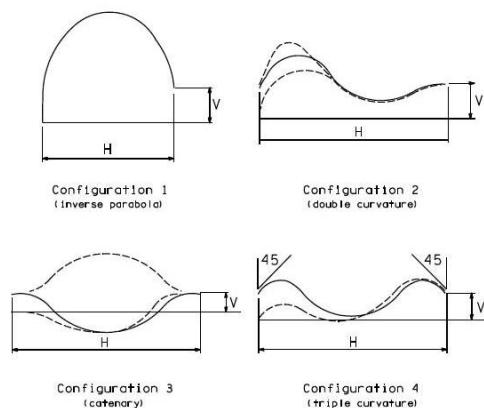
Električni element	Omjer pomaka metodom SDOF	Omjer pomaka metodom konačnih elemenata
Potporni izolator	0,525	0,610
Rastavljač	1,12	1,2

Opisane analitičke metode odnose se na konfiguracije od dva povezana električna elementa. U pravilu, električni elementi u postrojenjima su vezani sa više drugih elemenata te stoga pri vanjskim poticajima poput potresa dolazi do međusobne interakcije više električnih elemenata. Međutim, potpuni fizikalni modeli takvih konfiguracija koji su puno bliži stvarnom stanju u postrojenjima, prema trenutnim saznanjima autora, nisu razvijeni.

#### 4. SMJERNICE I UPUTE ZA PROJEKTIRANJE SPOJNIH ELEMENATA U POSTROJENJIMA

Kako bi se izbjegle potencijalne štete koje mogu nastati prilikom razornih djelovanja potresa potrebno je posebnu pozornost posvetiti projektiranju i u konačnici izvedbi spojnih elemenata u visokonaponskim postrojenjima vanjske izvedbe. Određene smjernice i upute dane su normama IEEE 693 [6] i IEEE 1527 [7], a koje se odnose na izvedbe fleksibilnih spojnih elemenata biti će ukratko opisane u daljnjem tekstu.

Ovisno o razini naprezanja koja se očekuju, geometriji samog spoja te zahtjevima o naponskim razmacima prema [7] predlažu se sljedeće konfiguracije, prikazane na slici 5, za povezivanje električnih aparata fleksibilnim spojnicama.



Slika 5 Osnovne konfiguracije spojeva fleksibilnim vodičima prema [7]

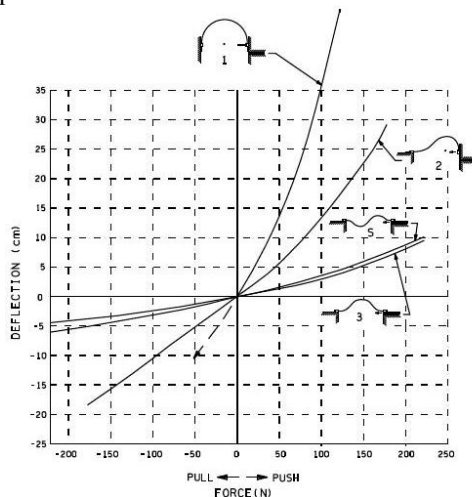
Prikazane konfiguracije bi trebale za odabrani slučaj omogućiti gibanje spojenih aparata bez uzrokovanja dodatnih sila na aparate ili povećanja sila koje bi mogle uzrokovati štetu na njima. Prva konfiguracija na slici 5 primjenjuje se u slučajevima kada se očekuju izrazito velika gibanja, odnosno pomaci spojenih aparata. Pri tome se mora paziti na najveći dopušteni razmak iznad kojeg navedena konfiguracija poprima oblik konfiguracije 4 na slici 5. Dodatna krutost navedene konfiguracije može se postići dodavanjem jednog ili više paralelnih vodiča povezanih odstojećima.

Konfiguracija 2 sa slike 5 se koristi kada je neophodno da jedan kraj bude horizontalno učvršćen, dok se drugi kraj može učvrstiti pod određenim kutom, najčešće pod kutom od 45°.

Konfiguracija 3 sa slike 5 je najčešće korištena konfiguracija spojnog elementa, međutim kod nje se posebna pažnja mora posvetiti provjesu da se ne bi ugrozili zahtjevi za naponskim razmacima. Koristi se gdje se ne očekuju velika njihanja električnih aparata ili gdje su dopušteni veći provjesi.

Konfiguracija 4 se upotrebljava ako postoji problem sa naponskim razmakom prema zemlji. Prikladna je za veće udaljenosti gdje se ne može koristiti konfiguracija 1. Pri malim udaljenostima ne preporuča se koristiti zbog prevelike krutosti.

Prema [7] provedena su ispitivanja fleksibilnosti pojedine konfiguracije što je prikazano na slici 6. Iz prikazanog dijagrama se može vidjeti da konfiguracija 1 sa slike 5 ima značajne prednosti pred konfiguracijom 2 odnosno pred konfiguracijom 3 koja se najčešće u praksi koristi.



Slika 6 Karakteristike pojedine konfiguracije prema [7]

U navedenim IEEE normama [6] i [7] navedeno je još niz uputa i prijedloga za odabir odgovarajućih razmaka i načina povezivanja električnih aparata. Međutim, preporuke spomenutih normi ponekad nisu dovoljno jasne, odnosno teško ih je primijeniti u konkretnim slučajevima pri projektiranju i izgradnji rasklopnih postrojenja, pa se stoga često pribjegava mnogim kompromisima, poput onih opisanih u [5].

## 5. ZAKLJUČAK

Dinamičko međudjelovanje električnih aparata i spojeva visokonaponskih rasklopnih postrojenja u dosadašnjoj praksi pri projektiranju i izgradnji često je bilo potpuno ili u velikoj mjeri zanemarivano. U postrojenjima gdje su se dogodili razorni potresi naknadnim analizama je ustanovljeno da su upravo dinamička ponašanja i međudjelovanja električnih aparata i spojeva u velikoj mjeri uzročnici šteta.

Malobrojna istraživanja i analize, kao što je prikazano u poglavlju 3 ovog rada, pokazala su da se pomaci, a samim time i mehanička naprezanja spojenih električnih aparata, mogu prigušiti odnosno smanjiti, ali i povećati uslijed dinamičkog međudjelovanja sa spojevima i drugim spojenim aparatom. Nedostatci tih analiza jesu ograničenja same promatrane konfiguracije jer se promatraju međudjelovanja samo dva električna aparata spojena fleksibilnom ili krutom vezom. Prijedlog za daljnja istraživanja i analize jesu da se promatraju kompletni sustavi međusobno povezanih aparata kakvi se i nalaze u stvarnim postrojenjima te da se iz toga dobiju rezultati koji bi samim time bili i bliži realnim slučajevima.

Na temelju prije spomenutih malobrojnih istraživanja nastale su određene upute i smjernice koje su dane u IEEE normama [6] i [7]. Međutim, zbog nemogućnosti potpunog ispunjavanja uputa iz navedenih normi pri projektiranju i izvođenju postrojenja često se pribjegava različitim kompromisima. To se odnosi na nedefiniranu primjenu tih preporuka na određeno seizmičko područje što se ostavlja na procjenu osobi koja projektira te primjeni mnogih pojednostavljenja pri analizama konačne rezultate udaljava od stvarnih vrijednosti. Unatoč nedostacima, norme [6] i [7] daju korisne smjernice koje projektantima mogu koristiti kako bi postrojenje bilo što otpornije na razorna djelovanja uslijed potresa.

Također je bitno naglasiti da je područje Republike Hrvatske i susjednih zemalja dio mediteransko-transazijskog pojasa koji se odlikuje izraženom seizmičkom aktivnošću. Mnoge procjene iz stručnih literatura, poput onih iz [8], upozoravaju na opasnosti od prirodnih katastrofa poput potresa te pozivaju na povećanje razine otpornosti važnih sustava na djelovanje potresa. Iznimno važan sustav je zasigurno elektroenergetski sustav pa je stoga nužno da se što prije način projektiranja prilikom izgradnje novih, ali i rekonstrukcije postojećih elektroenergetskih postrojenja, uključi u svjetske trendove projektiranja i izgradnje seizmički otpornih postrojenja.

## LITERATURA

- [1] Dastous, J-B; Pierre, J-R : Experimental investigation on the dynamic behavior of flexible conductors etween substation equipment during an earthquake, IEEE, 04.1996.
- [2] Terek, V., Jugović, R., Bojanić, B.: Analiza seizmičkih utjecaja na dinamičku otpornost strujnog mjernog transformatora AGU-420, KONČAR - stručne informacije, Zagreb, 1987.
- [3] Ravlić, V.: "Cijevne sabirnice u visokonaponskim postrojenjima, RAVEL/KIGEN, Zagreb, 2006.
- [4] Song, J., Kiureghian, A.D., Sackman, J.L.: Seismic Response and Reliability of Electrical Substation Equipment and Systems, PEER, Berkeley, 2006.
- [5] Čulina, A., Ambrozić, D.: Projektiranje trafostanica u seizmički aktivnim područjima, HRO CIGRE, Cavtat, 2010.
- [6] IEEE Std 693-2005: IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, 2005.
- [7] IEEE Std 1527-2006: IEEE Recommended Practice for Design of Flexile Buswork Located in Seismically Active Areas, 2006.
- [8] Procjena ugroženosti Republike Hrvatske od prirodnih i tehničko tehnoloških katastrofa i velikih nesreća, Državna uprava za zaštitu i spašavanje Republike Hrvatske, 05.2009.