

IZBOR ODNOSA KRATKOG SPOJA I SINHRONIH REAKTANSI GENERATORA SA ASPEKATA ZAHTEVA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Dragan P.Popović, Miloš Lj. Stojković

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Sadržaj: U radu se izlažu relevantni metodološki i praktični aspekti izbora najpovoljnijih vrednosti odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronih reaktansi generatora. Predmet pažnje su nove hidroelektrane, čije se priključenje na mrežu Srbije planira na naponskom nivou 110 kV (HE Brodarevo, HE Ribarići, HE Svođe i HE Arilje). Takođe, predmet pažnje su i postojeće hidroelektrane, priključene na naponskim nivoima 110 kV i 35 kV, koje su predviđene za revitalizaciju (HE Zvornik, Vlasinske HE, Limske HE, HE Ovčar Banja i HE Međuvršje), za posmatrani vremenski period do 2020. godine.

Ključne reči: odnos kratkog spoja, sinhrona reaktanse, generator, revitalizacija

1. UVOD

Generalno gledano, kod izbora parametara sinhronih generatora, uz uvažavanje ekonomskih kriterijuma, neophodno je da se postigne razumni kompromis između cene njihovih konstrukcija, pogonskih troškova i kvaliteta plasirane električne energije u EES, odnosno neophodno je da se uvažavaju i zahtevi koje neminovno nameće EES (tzv. sistemski zahtevi).

Dakle, u pitanju je jedan veoma složeni tehno-ekonomski problem. Poznato je da prisutni ekonomski i tehničko-tehnološki faktori uslovljavaju porast jediničnih snaga generatora, a time, po pravilu, i neminovno pogoršanje (sa aspekta EES-a) određenih parametara generatora. To je u prvom redu vezano za turbogeneratore. S druge strane, izbor nominalne snage hidrogeneratora je u prvom redu determinisan karakteristikama energetskog izvora, pri čemu njegova konstrukcija ima u potpunosti individualni karakter, s obzirom da je ona uslovljena velikim brojem promenljivih faktora.

Jedna od aktivnosti na planu izbora najpovoljnijih vrednosti parametara generatora je izrada Studije [1]. U njoj, predmet pažnje bile su nove hidroelektrane, čije se priključenje na mrežu Srbije planira na naponskom nivou 110 kV (HE Brodarevo, HE Ribarići, HE Svođe i HE Arilje) [2]. Takođe, predmet pažnje bile su i postojeće hidroelektrane, priključene na naponskim nivoima 110 kV i 35 kV, koje su predviđene za revitalizaciju (HE Zvornik, Vlasinske HE, Limske HE, HE Ovčar Banja i HE Međuvršje) [3, 4], za posmatrani vremenski period do 2020. godine. Zadatak je bio da se definišu optimalni (bolje je reći - najpovoljniji) parametri sinhronih generatora i blok-transformatora hidroelektrana, koje će biti priključene na prenosnu mrežu 110 kV kao i da se izvrši analiza, odnosno preispitivanje ovih parametara za već postojeće hidroelektrane priključene na prenosnu mrežu 110 i 35 kV, koje će biti obuhvaćene revitalizacijom. U pomenutom kontekstu, veliki praktični značaj ima adekvatni izbor odnosa kratkog spoja i sinhronih reaktansi.

Predmet ovoga rada je izbor najpovoljnijih vrednosti odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronih reaktansi pomenutih novih hidrogeneratora, kao i preispitivanje ovih parametara kod hidrogeneratora, predviđenih za revitalizaciju.

2. TEHNO-EKONOMSKI ASPEKTI IZBORA

2.1. Uvodne napomene

Da bi se sagledala pre svega ekonomska strana problema određivanja i izbora parametara generatora, u tekstu koji sledi, biće prikazana zavisnost cene i težine mašine od veličine pojedinih parametara, kao i njihova (veoma složena) međusobna zavisnost. U tome su mnogo pomogle reference [5, 6] ("dobre, stare reference", koje i danas imaju aktuelnost), iz kojih je najveći deo izloženog u narednom tekstu, neposredno preuzet. Takođe, u ovome su pomogle i reference [7, 8, 9].

Pre početka analize pojedinih parametara, potrebno je da se definiše pojam prirodnih vrednosti odgovarajućih parametara agregata, odnosno generatora. Pod prirodnom vrednošću parametra smatra se ona njegova vrednost koja se dobija optimalnim dimenzionisanjem generatora, odnosno agregata, u električnom i mehaničkom pogledu, za zadatu prividnu snagu i učestanost (za hidrogeneratore, i za dati pad i dozvoljenu brzinu pobega). Pri tome potrebno je da se napomene da se ove vrednosti mogu da razlikuju, zavisno od načina i prilaza tzv. optimalnoj konstrukciji od strane proizvođača generatora. Međutim, u odgovarajućim standardima ne postoji termin "prirodna vrednost", pa je pogodnija formulacija da su to "tipične vrednosti", ili "konstrukcione vrednosti", odnosno vrednosti koje daje konstruktor generatora.

U dosadašnjoj studijskoj praksi, po pravilu, utvrđivalo se da li su te prirodne, odnosno tipične vrednosti (odnosno njihov mogući opseg) zadovoljavajuće sa aspekata različitih zahteva EES-a (u statičkom i dinamičkom pogledu). Ako se utvrdi da te prirodne vrednosti zadovoljavaju ove zahteve, onda su to praktično i najpovoljnija rešenja (izbegavajući seriozni termin - optimalna rešenja). Na veličine reaktansi generatora fundamentalni uticaj ima njegova konstrukcija (dimenzije i materijal). Takođe, na ove vrednosti imaju uticaja (u mnogo manjem obimu) veličine napona i struja, koje neposredno utiču na vrednosti permeabilnosti magnetnog kola generatora. Dakle, iako se reaktanse svrstavaju u kategoriju tzv. konstanti sinhronih mašina, one, strogo uzevši, nisu konstantne vrednosti. U praksi se koriste njihove zasićene i nezasićene vrednosti, zavisno od prirode i karaktera analiza.

2.2. Odnos kratkog spoja i sinhrona reaktansa po podužnoj osi

Osnovni parametar sinhrona mašine je odnos kratkog spoja (K_s). On se određuje iz karakteristika (ogleda) praznog hoda i kratkog spoja generatora. Predstavlja odnos pobudne struje koja odgovara nominalnom naponu generatora u praznom hodu i pobudne struje koja odgovara nominalnoj struji pri kratkom spoju.

Sinhrona reaktansa u podužnoj (direktnoj) osi x_d , određuje se takođe iz karakteristika (ogleda) praznog hoda i kratkog spoja generatora. Predstavlja odnos napona praznog hoda, sa pravolinijske (linearne) karakteristike praznog hoda i struje sa karakteristike kratkog spoja, za istu vrednost pobudne struje. To je njena nezasićena vrednost.

Produžetak pravolinijskog dela karakteristike praznog hoda predstavlja magnetnu karakteristiku međugvožđa generatora. Predstavlja i karakteristiku praznog hoda ako se zanemari zasićenje, i koristi se za definisanje sinhronne reaktanse x_d . Stvarna karakteristika praznog hoda nije linearna, kao posledica prisutnog zasićenja magnetnog kola. Permeabilitet magnetnog kola nije konstantna veličina, jer se menja sa promenom magnetnopobudne sile (m_p). Smanjuje se sa porastom m_p , tako da magnetna indukcija, odnosno elektromotorna sila (e_m) koja je njoj proporcionalna, raste sporije od struje pobude. To je poznati fenomen zasićenja, koji unosi nelinearnost u odnosima između pojedinih veličina. Permeabilitet, dakle i zasićenje magnetnog kola, generalno gledano, zavisi od zajedničke m_p rotora i statora i od njihovog međusobnog položaja, odnosno od radnog faktora snage generatora.

Inverzna vrednost odnosa kratkog spoja $1/K_s$ i sinhronne reaktanse u podužnoj osi (nezasićena x_d i zasićena x_{dz} vrednost) imaju sledeći odnos:

$$1/K_s = x_d / k = x_{dz}, \quad (1)$$

gde je k - faktor zasićenja.

Odnos kratkog spoja, odnosno sinhrona reaktansa po podužnoj osi neposredno utiče na karakteristike i gabarit sinhronne mašine. U prvom redu to se odnosi na rezervu statičke stabilnosti, kao i uticaj na elektromagnetne i fizičke parametre generatora. Odnosno, pri zadatim gabaritima, veća vrednost K_s odgovara većem zazoru (manjoj vrednosti sinhronne reaktanse), što dovodi do povećanja m_p rotora. To, sa tehnološko-konstruktivnog aspekta može da predstavlja problem. Za veće vrednosti K_s , trebalo bi da se smanji snaga generatora. Dakle, sa povećanjem K_s smanjuje se snaga mašine za isti gabarit, i obratno, što neposredno utiče na cenu generatora. Dalje, veličina trajne struje kratkog spoja generatora je direktno proporcionalna K_s . Takva proporcionalnost postoji i za sposobnost apsorbovanja reaktivne snage generatora iz EES-a.

Na taj način, veličina odnosa kratkog spoja je od neposrednog uticaja na pogonske performanse generatora, kao i na njegovu veličinu i cenu. Manja vrednost K_s , za istu snagu, znači da je generator manjeg gabarita i niže cene, ali se zahteva veća promena pobudne struje za održavanje zadate vrednosti napona na krajevima generatora, pri promeni njegovog opterećenja. To eksplicira zahteve za pobudnim sistemima i njihovoj regulaciji, u smislu većih promena pobudne struje, uz odgovarajuću brzinu i pouzdanost. S toga, razvoj savremenih pobudnih sistema i sistema njihove regulacije, omogućuju da se savremeni generatori izrađuju sa nižim vrednostima K_s , odnosno omogućena je izgradnja generatora većih snaga, uz niže jedinične cene.

U tehničko-tehnološkom smislu, kako je to već istaknuto, porast vrednosti reaktansi generatora pogoršava uslove rada generatora. Drugim rečima, sa ovog aspekta je poželjno da vrednosti reaktansi generatora budu što manje (izuzetak od toga zahteva je subtranzijentna reaktansa). Međutim, u tom je smislu neophodno sagledavanje i druge strane problema, a to su zahtevi ekonomike i tehnologije gradnje generatora.

Za određivanje dimenzija sinhronne mašine merodavna je vrednost njene električne prividne snage. Izraz za električnu prividnu snagu (ili preciznije, proračunsku ili unutrašnju snagu) generatora, u funkciji mehaničkih dimenzija i elektromagnetnih veličina, glasi:

$$S = 1.11 \cdot D^2 \cdot l \cdot n \cdot AS_1 \cdot B_\delta \cdot 10^{-5} \quad [MVA] \quad (2)$$

gde je:

D - unutrašnji prečnik jezgra statora [m];

l - aktivna dužina jezgra (gvožđa) statora [m];

n - broj obrtaja generatora [o/min];

AS_1 - strujno opterećenje statora [A/sm];

B_δ - magnetna indukcija u međugvožđu generatora [T].

Reaktansa x_a , koja odgovara reakciji statora generatora i koja čini glavni deo sinhronne reaktanse, data je sledećim izrazom:

$$x_a = \frac{\tau_p}{\delta} \frac{AS_1}{B_\delta} \quad (3)$$

gde je:

$\frac{\tau_p}{\delta}$ - odnos polnog koraka prema veličini međugvožđa;

Saglasno relaciji (2), uočava se da se najekonomičnije povećanje snage generatora može da postigne povećavanjem strujnog opterećenja statora (AS_1). Međutim, saglasno relaciji (3), to bi dovelo do povećanja reaktanse x_a . Dakle, reč je o oprečnim zahtevima, koji zahtevaju iznalaženje nekog razumnog kompromisa.

Sinhrona reaktansa x_d i tranzijentna reaktansa x_d' imaju zajedničku komponentu $x_{a\delta}$, rasipnu reaktansu statora. Ova rasipna reaktansa $x_{a\delta}$ je praktično nepromenljiva veličina i sastavna je komponenta svih reaktansi sinhronne mašine. Ona rezultira iz razlike između ukupnog fluksa koji proizvodi struja u statoru (bez učešća ostalih kontura sinhronne mašine) i fluksa u međugvožđu. Ta razlika je rasipni fluks koji se sastoji od rasipnog fluksa u žljebovima statora i čeonim delovima namotaja statora i diferencijalnog rasipanja, usled viših harmonika u mps statora.

Sinhrona reaktansa x_d i tranzijentna reaktansa x_d' su uplvisane reaktansom reakcije statora x_a . To znači da su obe ove reaktanse determinisane konstruktivnim parametrima generatora, i da se nalaze u jednoj složenoj međusobnoj zavisnosti.

Generalno gledano, uticaj veličina sinhronne i tranzijentne reaktanse na težinu i cenu sinhronne mašine zavisi od mnogih faktora, kao što su tip generatora (hidro ili termo), faktora snage, momenta inercije i dr. Proračuni pokazuju da se zavisnost težine i cene sinhronog generatora od veličine sinhronne reaktanse može da izrazi posredstvom sledećih približnih empirijskih formula:

$$G = \frac{k}{x_d^m}, \quad (4)$$

$$C = \frac{k'}{x_d^n} \quad (5)$$

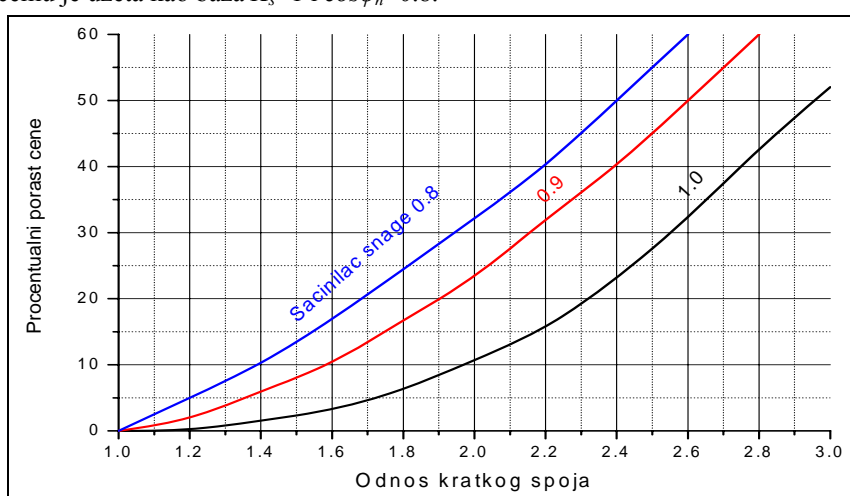
gde su G i C težina i cena izražene u delovima neke bazne veličine, a $m < 1$ i $n > 1$ odgovarajući eksponenti.

Za hidrogeneratore uobičajene konstrukcije ($\cos\varphi=0.9$, prirodna vrednost vremenske konstante inercije agregata, brzina pobega $n_p=1.8 n_n$) ocenjuje se da je varijacija cene $\Delta C=0.25\%$, za svaki 1% varijacije K_c iznad prirodne vrednosti, saglasno pokazateljima iz Tabele 1.

Tabela 1: Varijacije cene hidrogeneratorsa za svaki % varijacije K_s

K_s/K_{sp}	1	1.5	2
K_s %	0	50	100
C %	0	12.5	25

Na Slici 1 prikazan je porast cene hidrogeneratorsa u funkciji odnosa kratkog spoja, pri čemu je uzeta kao baza $K_s=1$ i $\cos\varphi_n=0.8$.



Slika 1: Uticaj odnosa kratkog spoja na cenu koštanja (za bazu je uzet odnos kratkog spoja u iznosu 1.0 i nominalni faktor (sačinilac) snage u iznosu 0.8)

Kod hidrogeneratorsa, veličina K_s , pored ostalih konstruktivnih karakteristika, najviše je zavisna od broja polova. Najčešće susretane vrednosti kod generatora starijih konstrukcija date su u Tabeli 2.

Tabela 2: Vrednosti K_s u zavisnosti od broja polova za hidrogeneratorsa starijih konstrukcija

Broj polova	8 do 14	16 do 30	Preko 30
K_s	0.8 do 1.1	0.9 do 1.2	1.0 do 1.3

Korišćenjem savremenih pobudnih sistema i regulatora pobude, omogućena je ekonomična i pogonski pouzdana konstrukcija generatora sa minimalnim vrednostima K_s , kojima prirodno teže proizvođači, a koje su prihvatljive i za korisnike. U Tabeli 3 date su ove vrednosti K_s u funkciji broja polova, za hidrogeneratorsa savremenih konstrukcija.

Tabela 3: Vrednosti K_s u zavisnosti od broja polova za hidrogeneratore savremenih konstrukcija

Broj polova	8 do 14	16 do 30	Preko 30
K_s	0.65 do 0.8	0.7 do 0.85	1.0 do 1.1

2.3. Sinhrona reaktansa u poprečnoj osi x_q

Za razliku od turbogeneratora, kod hidrogeneratora postoji značajna razlika između sinhronih reaktansi u podužnoj x_d i poprečnoj osi x_q . To je poznati fenomen magnetne isturenosti, koji je karakterističan za sinhronu mašinu sa istaknutim polovima, u koje spadaju hidrogeneratori.

U objašnjenju ovoga fenomena, poslužiće sledeći misaoni eksperiment. Naime, kada se osa rotirajućeg rotora poklopi sa vektorom koji predstavlja maksimalnu vrednost mps statora, putanja magnetnog fluksa ima najmanji magnetni otpor, tako da je vrednost fluksa najveća. Reaktansa koja tome odgovara je sinhrona reaktansa u podužnoj (ili direktnoj) osi sinhronu mašine x_d , o kojoj je bilo reči u prethodnom izlaganju. U situaciji kada je osa rotirajućeg rotora upravna na vektor mps statora, zbog povećanog međugvožđa povećan je i magnetni otpor, tako da magnetni fluks ima najmanju vrednost. Reaktansa koja odgovara tom položaju je sinhrona reaktansa u poprečnoj osi sinhronu mašine x_q . Postoji sledeći odnosi između ovih reaktansi - $x_q = (0.5 - 0.7) x_d$, a najčešće se susreću sledeći njihovi odnosi - $x_q = (0.56 - 0.65) x_d$.

3. METODOLOŠKI I PRAKTIČNI ASPEKTI ANALIZA STATIČKE STABILNOSTI

3.1. Uvodne napomene

Analize statičke stabilnosti vršene su prvenstveno u cilju utvrđivanja povoljnog opsega vrednosti odnosa kratkog spoja (K_s), odnosno sinhronih reaktansi u podužnoj osi (x_d) razmatranih hidrogeneratora, jer su to veličine koje u najvećoj meri utiču na iznos rezerve statičke stabilnosti. Uticaj veličine odnosa kratkog spoja razmatran je u interaktivnoj sprezi sa uticajem zamajnog momenata agregata, odnosno vremenske konstante inercije agregata (T_i), vremenske konstante pobudnog kola pri otvorenom statorskom namotaju (T_{d0}), kao i uticajem parametara pobudnog sistema i njegove regulacije razmatranih hidrogeneratora.

3.2. Metodološki i praktični aspekti analiza statičke stabilnosti

Za razliku od uobičajenih prilaza analizi statičke stabilnosti (linearizacija, formiranje odgovarajućih matrica stanja i određivanje njihovih sopstvenih vrednosti i sopstvenih vektora - "model linearization and solving the eigenvalues problem") u Institutu "Nikola Tesla" razvijen je drukčiji prilaz. U njemu se prate elektromehanički prelazni procesi nastalih nakon tipičnih "malih tzv. regularnih poremećaja" (na primer, simultana promena ukupne potrošnje za nekoliko procenata) sa aspekta analize statičke stabilnosti. Uz tretiranje individualne dinamike svake od sinhronih mašina, odnosno uz određivanje njihovih sopstvenih učestanosti, prati se i kretanje "centra inercije" kompletnog EES-a, u dovoljno dugom vremenskom periodu (do 30 s), koje je indikativno za sagledavanje globalnih efekata. Takođe, prate se i stanja na svim relevantnim elementima tokom odvijanja prelaznog elektromehaničkog procesa

(određivanje aktivnih i reaktivnih snaga, struja i fazora napona), čime se dobija detaljni uvid u sam tok odvijanja "odziva" EES-a na pojavu "malog regularnog poremećaja". Naravno, ne bi trebalo da se posebno naglašava koliko je ovakav prilaz efikasniji od uobičajenih (a koji su bazirani na linearizaciji).

Takav prilaz je zahtevao modelovanje kompletne električne mreže EES-a i svih njegovih relevantnih komponenti, uključujući odgovarajuće regulacione i zaštitne uređaje (u prvom redu to se odnosi na detaljnije modelovanje sinhronih mašina i njihovih regulacionih sistema). Ovaj prilaz baziran je na tzv. standardnim modelima relevantnih komponenti EES-a, koji se uobičajeno koriste u tzv. sistemskim analizama [10 -19].

U okviru analiza dinamičke sigurnosti, nezaobilazno je obuhvatanje prelaznih stanja u pobudnom sistemu sinhronih mašina. Za te svrhe poslužili su standardizovani, tzv. "IEEE modeli" pobudnih sistema [10, 11, 12]. Međutim, u okviru ovih modela, ne nalazi se model tzv. multivarjabilnog, odnosno višezlaznog sistema regulacije pobude, koji postoji u našem sistemu. Stoga je, koristeći kao osnovu referencu [11], posebno razvijen model višezlaznog sistema regulacije pobude [13], za potrebe analiza različitih karakterističnih dinamičkih stanja EES-a Srbije i njegovog okruženja.

Model hidropostrojenja u celini, koji se uobičajeno koristi u sistemskim analizama [14 -18], sadrži sledeće submodele: hidrauličkih instalacija, hidroturbine i sistema njene regulacije. Kod formiranja ovoga modela, uobičajena pretpostavka je zanemarenje hidrauličnih prelaznih procesa u tunelu i vodostanu, za hidroelektrane koje to imaju. Dalje, prelazne karakteristike turbine definisane su dinamikom vode u cevovodu, uz zanemarenje gubitaka u njemu. Zatim, uvodi se pretpostavka o nestišljivosti vode i krutosti cevovoda, što omogućava korišćenje teorije tzv. krutog vodenog udara.

Dinamičke performanse hidroturbine, tretirane kao "idealne", opisuju se linerizovanim jednačinama. Vremenska konstanta T_W (vremenska konstanta cevovoda, za koju se koristi i termin - "vreme startovanja vode"), prisutna u modelu hidroturbine, definisana je dužinom cevovoda, protokom i padom [15], odnosno moguće je obuhvatanje različitih tipova hidroturbina, prisutnih u praksi.

3.2.1. Računarski program STATSTAB

Na bazi prethodno pomenutih matematičkih modela i razvijenih tehnika njihovog rešavanja (efikasna metoda numeričke integracije aktuelnih sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina [13, 20]), u Institutu "Nikola Tesla", razvijen je modularno organizovani računarski program STATSTAB, koji pored glavnog programa ima 41 potprograma tipa subroutine. U njegovoj realizaciji primenjen je Visual Fortran Professional Edition 6.0.0. Omogućeno je tretiranje interkonekcija sa 10000 čvorova, 30000 grana, 2000 generatora, 4000 transformatora i 200 regulacionih basena. Unošenje ulaznih podataka i prikazivanje dobijenih rezultata sprovedenih analiza je omogućeno posebnim editorima za čiji je razvoj korišćen *Microsoft Visual Basic 5.0*.

4. REZULTATI I KOMENTAR ANALIZA STATIČKE STABILNOSTI

4.1. Uvodne napomene

Sve analize za potrebe Studije [1] urađene na modelu realne elektroenergetske interkonekcije koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske,

Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. Podaci o susednim EES dobijeni su od Naručioca Studije [21]. Modelovane su kompletne visokonaponske mreže 220 i 400 kV u pomenutim EES (u EES Grčke, i relevantni delovi mreže 150 kV), uz napomenu da je kompletno modelovana mreža 110 kV u EES Srbije i sve TS 110/X kV. Pri tome, u potpunosti je respektovan dalji razvoj prenosne mreže Srbije, saglasno rezultatima Studije [22]. Takođe, modelovani su i odgovarajući delovi mreža na naponskom nivou 35 kV, kojima (delovima) gravitiraju HE Ovčar Banja, HE Međuvršje i HE Vrla 4, saglasno podacima iz studija [23, 24].

Za potrebe analiza dinamičkih stanja EES-a Srbije, korišćeni su interni podaci Instituta "Nikola Tesla", koji su godinama skupljani, proveravani, sređivani i ažurirani, a inovirani podaci, vezani za pobudne sisteme u EES Srbije, preuzeti su iz [25]. Podatke o planiranim novim hidroelektranama, kao i podatke o hidroelektranama, čija se revitalizacija planira [2], dostavio je u formi, sa kojom je raspolagao, Naručilac Studije [1]. Takođe, prikupljeni su i sređeni, u saradnji sa Naručiocem, planovi, načini i vremenske dinamike revitalizacije postojećih hidroelektrana, priključenih na prenosnu mrežu 110 i 35 kV EES EPS-a. U tome je pomogao materijal pod naslovom "B. Programi i projekti modernizacije i revitalizacije pojedinih hidroelektrana", koji je preuzet iz [3].

Sve analize obavljene su po sledećim etapama (tzv. "presečnim" godinama): 2010, 2015. i 2020, s tim što je mreža 110 kV i pomenuti delovi mreže 35 kV (uključujući i njeni utvrđeni dalji razvoj) detaljno modelovana za pomenuti vremenski horizont do 2020. godine. Pri tome, obuhvaćena su maksimalna i minimalna stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju, koja se očekuju pomenutih godina.

Početne analize karakterističnih statičkih i dinamičkih stanja sprovedene su su na prethodno pomenutom modelu realne elektroenergetske interkonekcije. Ove početne analize su omogućile da se izvrši odgovarajuća redukcija ovoga modela, koja je u potpunosti bila primerena potrebama i ciljevima ove Studije. U redukovanom modelu, zadržano je kompletno modelovanje mreže 400, 220 i 110 kV u EES Srbije i sve TS 110/X kV, pri čemu je u potpunosti uvažavan dalji razvoj mreže Srbije. Takođe, modelovani su i odgovarajući delovi mreža na naponskom nivou 35 kV, kojima gravitiraju HE Ovčar Banja, HE Međuvršje i HE Vrla 4, saglasno podacima iz [23, 24]. Za potrebe analiza statičkih stanja, zadržani su svi interkonektivni dalekovodi 400 i 220 kV EES-a Srbije, uz striktno uvažavanje stanja na njima, na čijim krajevima su zadržani granični čvorovi, koji su dobili atribuciju PV čvorova.

Za potrebe analiza dinamičkih stanja, odnosno statičke i tranzijentne stabilnosti, takođe su zadržani svi interkonektivni dalekovodi 400 i 220 kV EES-a Srbije, na čijim krajevima su priključeni specijalno formirani dinamički ekvivalenti. Ti ekvivalenti su formirani, na bazi prethodno utvrđenih i kvantifikovanih dinamičkih "odziva" susednih EES-a, pri kompletnom modelovanju razmatrane interkonekcije. Verifikacija ovoga redukovanog modela izvršena je preko međusobnog poređenja rezultata dobijenih sa njime i rezultata dobijenih za kompletno modelovanu razmatranu interkonekciju. Kako se to već i očekivalo, kada su u pitanju elektrane, koje su predmet ove Studije i njihovo "dinamičko ponašanje", za niz karakterističnih stanja i poremećaja, razlike u dobijenim rezultatima su bile u okvirima nekoliko procenata.

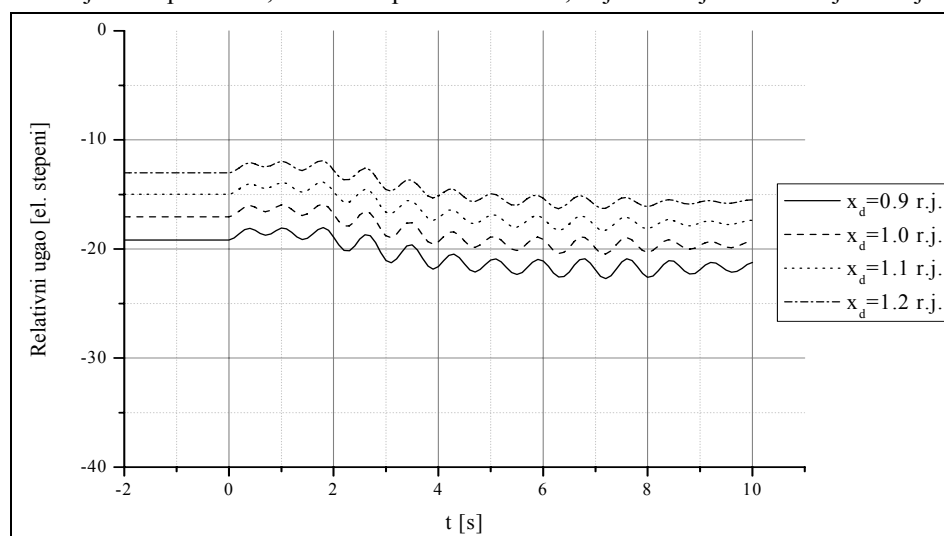
Primenom računarskog programa STATSTAB obavljene su analize statičke stabilnosti EES-a Srbije, sa njegovim širokim okruženjem. U sprovedenim analizama "regularni poremećaj" je simuliran simultanim povećanjem konzuma u celom

razmatranom EES Srbije za 10%, a ocena stabilnosti je vršena preko krivih oscilovanja generatora, formiranih za dovoljno dugi vremenski period (do 10 s).

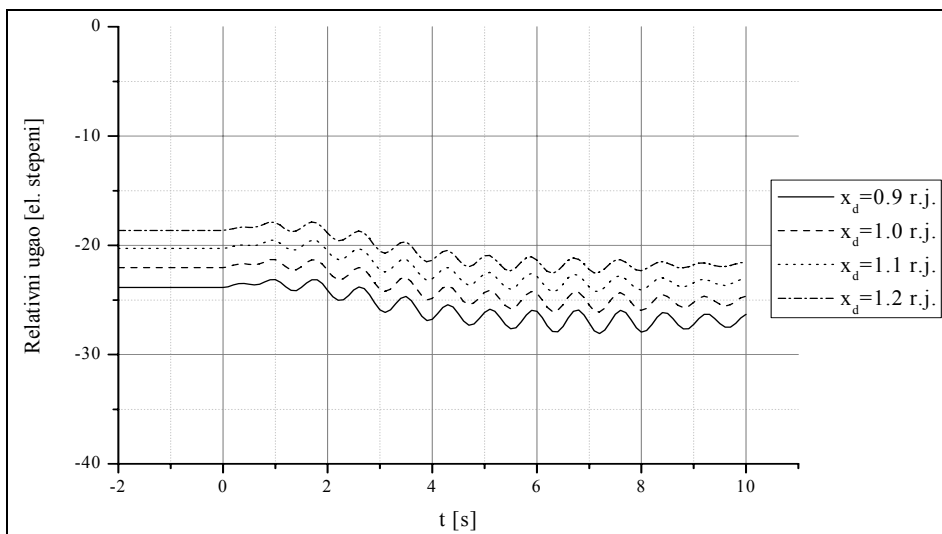
4.2. Utvrđivanje povoljnih vrednosti odnosa kratkog spoja generatora u novim hidroelektranama

Od niza dobijenih rezultata primene računarskog programa *STATSTAB*, u kontekstu utvrđivanja povoljnih vrednosti odnosa kratkog spoja generatora u novim hidroelektranama, daju se naredne Slike 2-5. Na Slici 2, za maksimalno stanje 2015. godine, daju se dinamički odzivi generatora u HE Brodarevo, za niz vrednosti sinhronne reaktanse u podužnoj osi x_d (0.9, 1.0, 1.1 i 1.2 r.j). U pitanju su bile zasićene vrednosti ovih reaktansi, kojima odgovaraju sledeće vrednosti odnosa kratkog spoja: 1.111, 1.000, 0.909 i 0.833. Naravno, sa varijacijom reaktanse x_d , vršena je i varijacija reaktanse x_q , zadržavajući njihov uobičajeni odnos (x_d/x_q) u iznosu od 1.5). Slika 3 odnosi se na HE Ribarići, za maksimalno stanje 2015. godine. Dinamički odzivi HE Arilje, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d , za maksimalno stanje 2020. godine, daju se na Slici 4, a na Slici 5, to isto se daje za HE Svode.

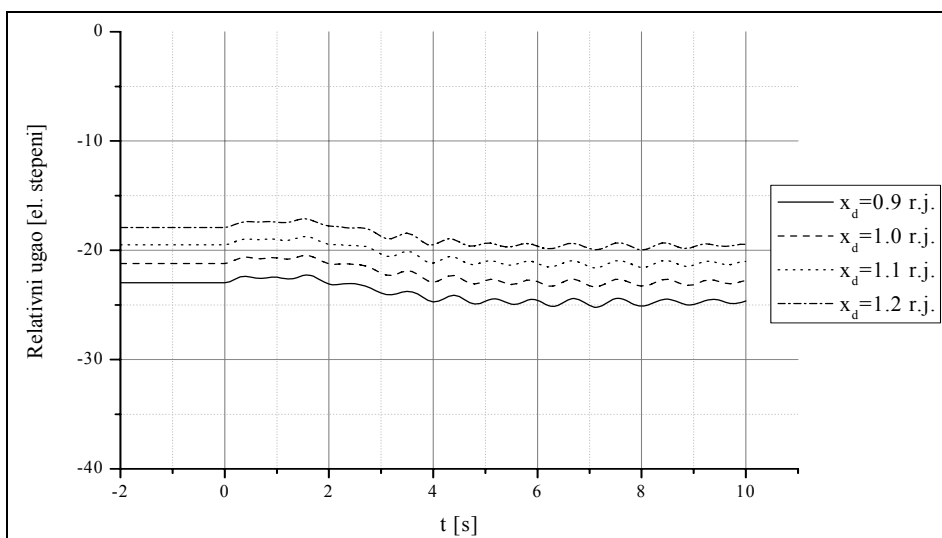
Dobijeni rezultati analiza, ukazuju na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom smislu) razmatranih novih hidrogeneratora, kao i ostalih generatora u EES Srbije, za razmatrani "regularni poremećaj". Na taj način, rezultati analiza statičke stabilnosti, koji uključuju i rezultate analiza osetljivosti na varijacije odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronne reaktanse po podužnoj osi, ukazuju da je i u uslovima šireg opsega vrednosti ovih parametara, koji može da se sretne u praksi, obezbeđena potrebna rezerva statičke stabilnosti. To praktično znači da je kod razmatranih novih hidrogeneratora omogućen izbor njihovih prirodnih, odnosno tipičnih vrednosti, koje su i najekonomičnije rešenje.



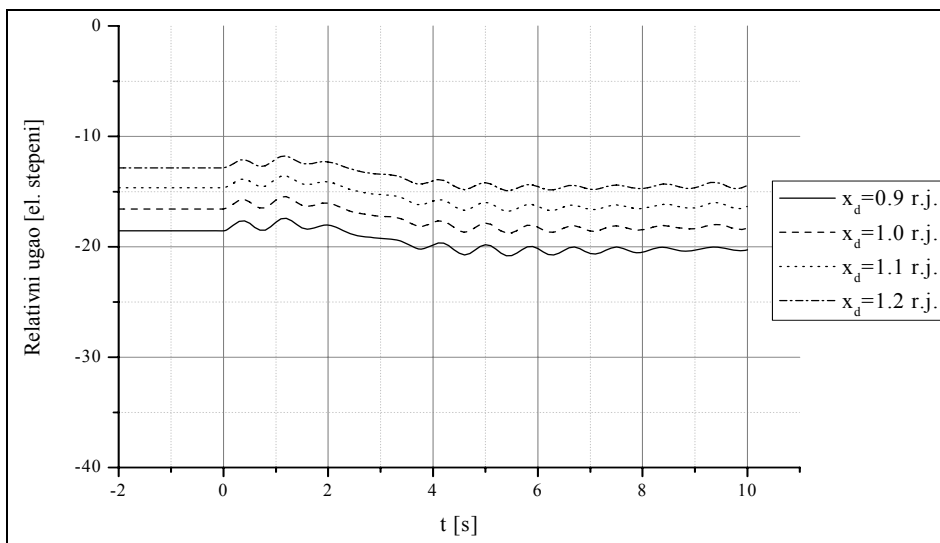
Slika 2: Dinamički odziv generatora u HE Brodarevo, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d (maksimalno stanje 2015. godine)



Slika 3: Dinamički odziv generatora u HE Ribarići, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d (maksimalno stanje 2015. godine)



Slika 4: Dinamički odziv generatora u HE Arilje, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d (maksimalno stanje 2020. godine)



Slika 5: Dinamički odziv generatora u HE Svođe, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d (maksimalno stanje 2020. godine)

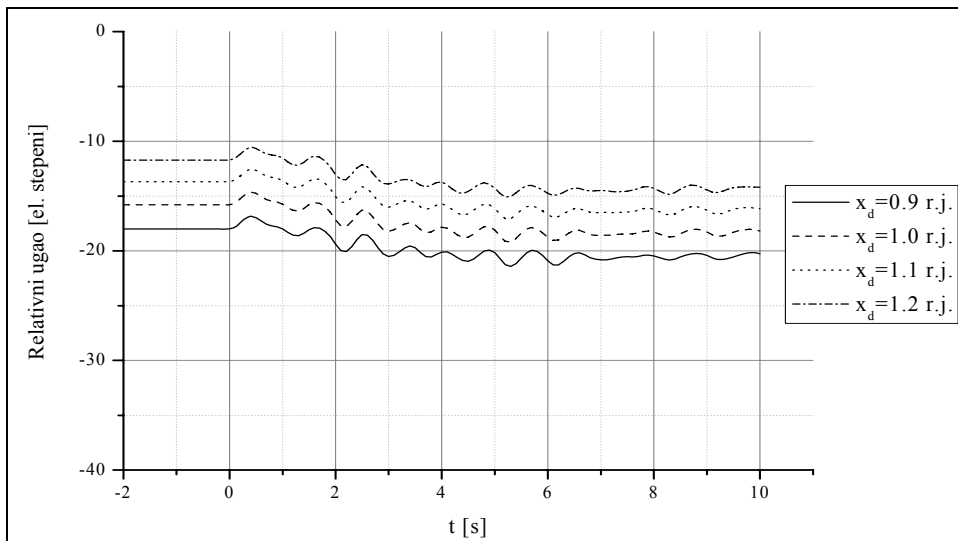
4.3. Utvrđivanje povoljnih vrednosti odnosa kratkog spoja generatora u hidroelektranama predviđenih za revitalizaciju

Analize statičke stabilnosti najpre su vršene za postojeće vrednosti relevantnih parametara generatora u hidroelektranama predviđenim za revitalizaciju. Međutim, kako je to bilo u slučaju revitalizacije HE Bajina Bašta [26, 27], očekuje se da će u procesu revitalizacije razmatranih generatora doći do odgovarajućih korekcija njihovih osnovnih parametara. Stoga je izvršena analiza uticaja različitih vrednosti sinhronih reaktansi u podužnoj osi x_d (0.9, 1.0, 1.1 i 1.2 r.j.) na dinamičko ponašanje analiziranih hidrogenatora.

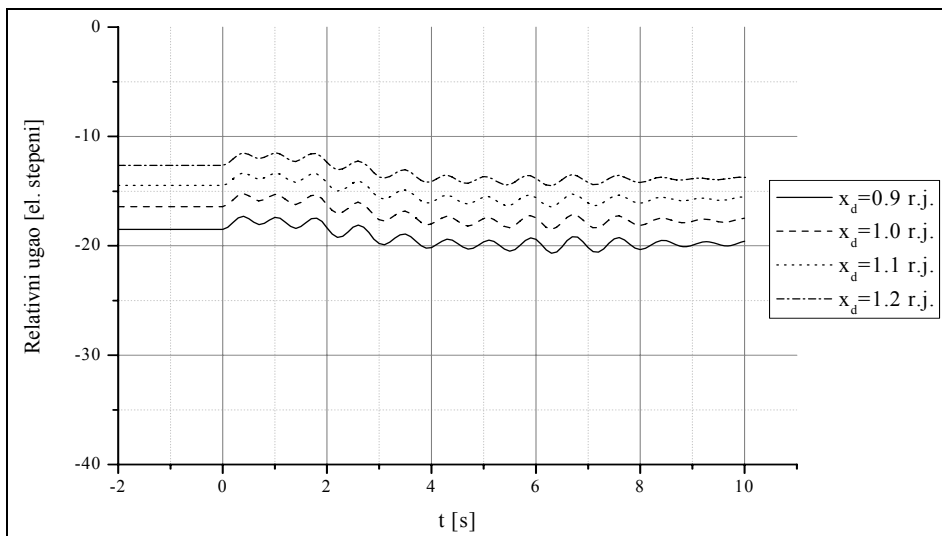
Od niza dobijenih rezultata, u kontekstu utvrđivanja povoljnih vrednosti odnosa kratkog spoja generatora u hidroelektranama, koje su predviđene za revitalizaciju, daju se naredne Slike 6 - 10, koje se odnose na maksimalno stanje 2015. godine. One su u potpunosti analogne sa prethodno datim Slikama 2-5.

Dakle, dobijeni rezultati analiza statičke stabilnosti, koji uključuju i rezultate analiza osetljivosti na varijacije odnosa kratkog spoja, čija je grafička interpretacija data na prethodnim slikama, takođe ukazuju na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom smislu) razmatranih hidrogenatora, koji su predviđeni za revitalizaciju, kao i ostalih generatora u EES Srbije. To praktično znači da je relaksiran problem oko vrednosti odnosa kratkog spoja, jer se ne očekuju njihove veće promene u toku revitalizacije, u odnosu na postojeće vrednosti.

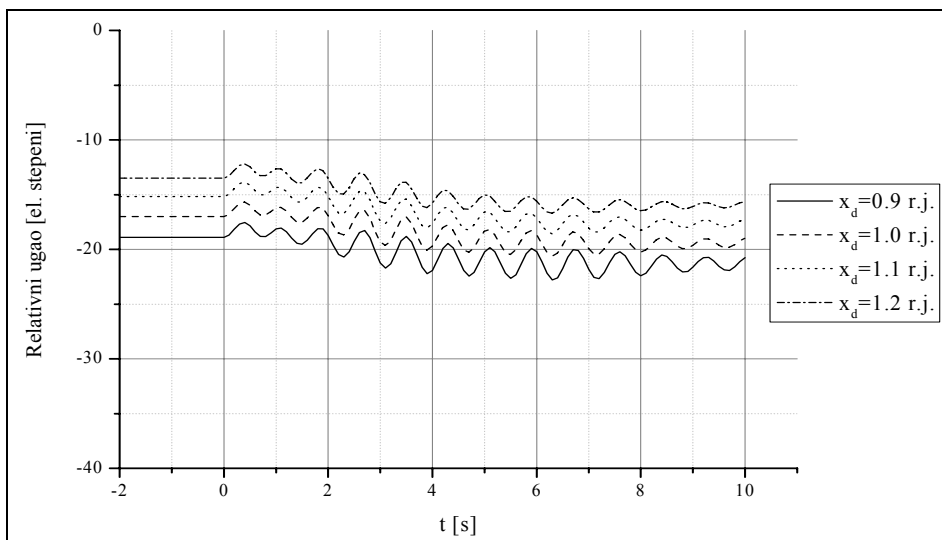
Na kraju, potrebno je da se naglasi, da se do analognih rezultata u pogledu mogućnosti nesmetanog izbora "prirodnih" vrednosti osnovnih parametara novih agregata dolazilo u prethodnim istraživanjima [28 - 32]. Rezultati toga su bili potvrđeni u praksi [28, 29].



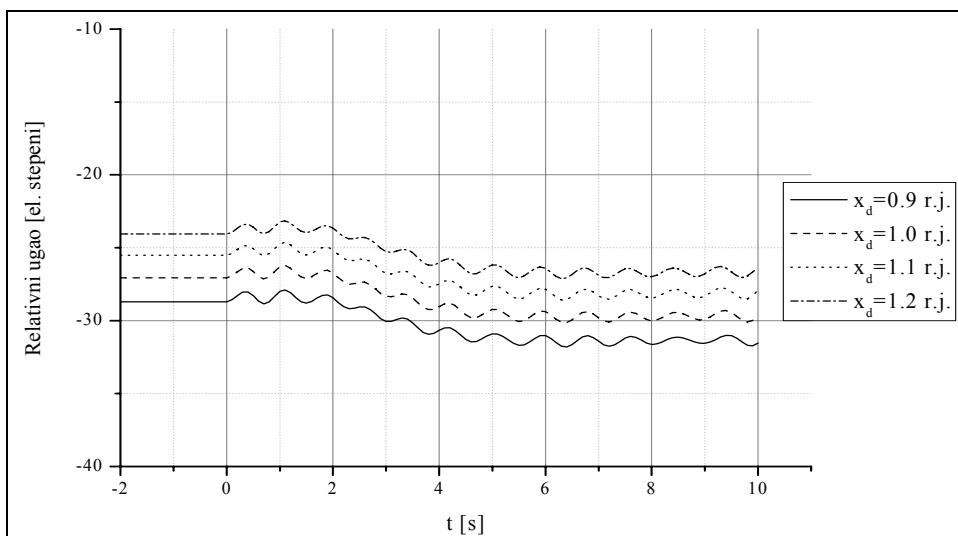
Slika 6: Dinamički odziv generatora u HE Kokin Brod, za niz vrednosti sinhronih reaktansi x_d (maksimalno stanje 2015. godine)



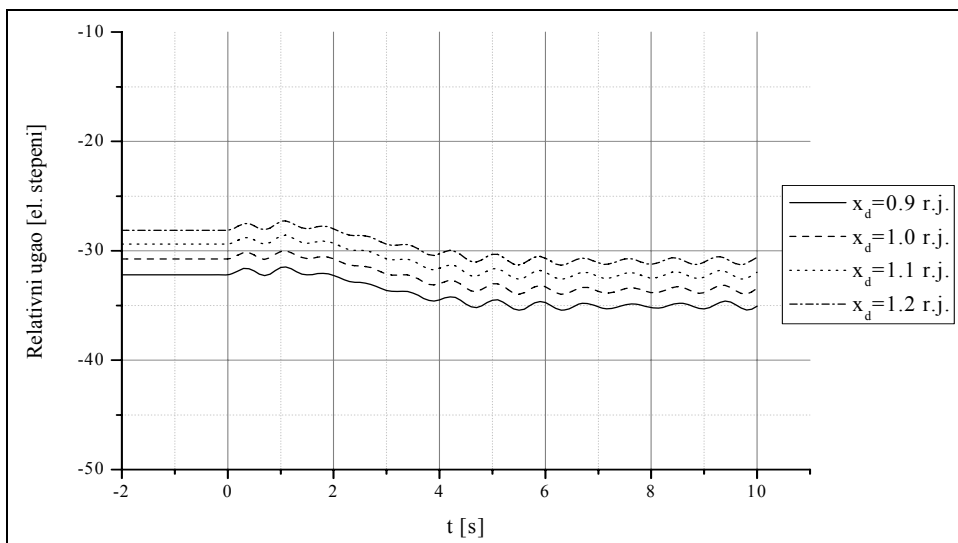
Slika 7: Dinamički odziv generatora u HE Potpeć, za niz vrednosti sinhronih reaktansi x_d (maksimalno stanje 2015. godine)



Slika 8: Dinamički odziv generatora u HE Uvac, za niz vrednosti sinhronih reaktansi x_d (maksimalno stanje 2015. godine)



Slika 9: Dinamički odziv generatora C i D u HE Vrla 1, za niz vrednosti sinhronih reaktansi x_d (maksimalno stanje 2015. godine)



Slika 10: Dinamički odziv generatora A u HE Vrla 2, za niz vrednosti sinhronih reaktansi x_d (maksimalno stanje 2015. godine)

5. ZAKLJUČCI

Dobijeni rezultati analiza ukazuju na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom smislu) razmatranih hidrogenatora, kao i ostalih generatora u EES Srbije, za razmatrani "regularni poremećaj" (simultano povećanje ukupnog konzuma u EES Srbije za 10%).

Na taj način, rezultati analiza statičke stabilnosti, koji uključuju i rezultate analiza osetljivosti na varijacije odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronu reaktanse po podužnoj osi, ukazuju da je i u uslovima šireg opsega vrednosti ovih parametara, koji može da se sretne u praksi, obezbeđena potrebna rezerva statičke stabilnosti. To praktično znači da je kod razmatranih novih hidrogenatora omogućen izbor njihovih "prirodnih", odnosno tipičnih vrednosti, koje su i najekonomičnije rešenje. Ujedno, kod razmatranih hidrogenatora, predviđenih za revitalizaciju, relaksiran je problem oko vrednosti odnosa kratkog spoja, jer se ne očekuju njihove veće promene u toku revitalizacije, u odnosu na postojeće vrednosti.

LITERATURA

- [1] "Izbor i analiza optimalnih parametara generatora i blok-transformatora hidroelektrana priključenih na prenosnu mrežu 110 i 35 kV EES EPS-a", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [2] Interna dokumentacija Direkcije za strategije i investicije EPS-a, vezana za nove hidroelektrane, čije se priključenje na mrežu Srbije planira na naponskim nivoima 110 i 35 kV, kao i za postojeće hidroelektrane, priključene na pomenutim naponskim nivoima.

- [3] "Program ostvarenja strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2015. godine za period od 2007. do 2012. godine", Dokument usvojen od strane Narodna skupština Srbije u maju 2005. godine ("Službeni glasnik RS" broj 44/05)
- [4] "Osnovna tehnička dokumentacija HE i TE u Srbiji", JP Elektroprivrede Srbije, Direkcija za upravljanje i marketing, Beograd, februar 1993.
- [5] "Izbor osnovnih parametara sinhronih mašina u elektroenergetskom sistemu Srbije", Zduženo elektroprivredno preduzeće Srbije, Beograd, april 1974.
- [6] *Prenos i distribucija električne energije*, Građevinska knjiga, Beograd, 1964.
- [7] Voljdek A.I., *Električne mašine* (knjiga na ruskom), "Energija", 1966.
- [8] Kovač K.P., Rac I. *Prelazni procesi u mašinama za naizmjeničnu struju* (knjiga na ruskom), GEI, 1963.
- [9] Kazovskij E.R., "Prelazni procesi u električnim mašinama za naizmjeničnu struju" (knjiga na ruskom), Akademija nauka SSSR, Moskva, Lenjingrad, 1962.
- [10] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-87, June 1968. pp. 1460-1464.
- [11] IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981., pp. 494-509.
- [12] "IEEE Standard Definition for Excitation Systems for Synchronous Machines", An American National Standard, The Institute of IEEE, NY, USA, 1986.
- [13] Popović D.P., "An Approach to the Evaluation of Electromechanical Transient Process in Power Systems", *Electric Power Systems Research*, Vol. 7, No. 2, 1984., pp. 141-151.
- [14] Čalović M., "Dynamic State-space Models of Electric Power Systems", report University of Illinois, USA, 1971.
- [15] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbine in Power System Studies", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-92, Dec.1972. pp. 1904-1915
- [16] Young C., "Equipment and System Modelling for Large Scale Stability Studies", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-91, No 1, Jan/Feb. 1972., pp.-99-109.
- [17] Foord T., " Step Response of a Governed Hydrogenerator", *Proc. IEE*, Vol. 125, No 11, Nov. 1978.
- [18] IEEE Working Group Report: "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.1, February 1992., pp.167-179
- [19] Kent M.H., Schmus W.R., McGrackin F.A., Wheeler L.M., "Dynamic Modeling of Loads in Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 5, May 1969., pp. 756-763.

- [20] Popović D.P, "A Simple and Reliable Procedure for the Evaluation of Short-term Dynamic Process in Power Systems", *Int. Journal of Electric Power and Energy Systems*, Vol. 8, No.4, October 1986, pp. 195-204.
- [21] "Planiranje izvora reaktivne snage u prenosnoj mreži EES Srbije - II faza" - finalna verzija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [22] "Studija dugoročnog razvoja prenosne mreže 400 kV, 220 kV i 110 kV na području Republike Srbije, za period do 2025. godine", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [23] "Dalji razvoj elektrodistributivne mreže i izbor srednjeg napona na području EPS JP Elektrosrbija Kraljevo - ED Čačak", Institut "Nikola Tesla", Beograd 2006.
- [24] "Studija perspektivnog dugoročnog razvoja električnih mreža naponskih nivoa 110 i 35 kV na području ogranaka Niš, Leskovac, Prokuplje, Piroć i Vranje u PD Jugoistok", Institut "Nikola Tesla", Beograd 2007.
- [25] "Regulacija napona odnosno pobudne struje sinhronih generatora u elektranama Elektroprivrede Srbije sa gledišta zahteva sistema", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2005.
- [26] "Provera ponašanja revitalizovanih agregata/generatora u HE Bajina Bašta u karakteristiknim režimima rada priključenih na mrežu EMS-a 220 kV- Analize statičke stabilnosti i analize mogućnosti nastajanja samopobuđivanja", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [27] "Provera ponašanja revitalizovanih agregata/generatora u HE Bajina Bašta u karakteristiknim režimima rada priključenih na mrežu EMS-a 220 kV - Analize tranzijentne stabilnosti", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [28] Provera efekata velikih turbogeneratora 300, 500 i 600 MW standardnih konstrukcija na zahtev uklapanja u sistem Srbije, 1978.
- [29] Popović D.P, Jovanović S.M, "Parametri i karakteristike velikih turbogeneratora 300, 500 i 600 MW sa aspekta uklapanja u elektroenergetski sistem", *XV stručno savetovanje elektroenergetičara*, Beograd, 1981.
- [30] Uklapanje u elektroenergetski sistem Istočne Hercegovine hidroelektrana Dabar, Nevesinje i Bileća, 1995.
- [31] Izbor elektromehaničkih parametara agregata hidroelektrana Dabar, Nevesinje i Bileća, 1995.
- [32] Mijailović S., Popović D.P., Vuković M., Anđelić D., "Uklapanje hidroelektrana Dabar, Nevesinje i Bileća u mrežu Istočne Hercegovine", *XXIII Savetovanje JUKO CIGRE*, Herceg Novi, 1997, referat 37-03

Abstract: The improved methodology of generator short circuit ratio and synchronous reactances determination is presented in this paper. New hydro power plants supposed to be connected at 110 kV are researched (HPP Brodarevo, HPP Ribarići, HPP Svođe and HPP Arilje). Also, the existing hydro power plants, which are planned for revitalization (HPP Žvornik, Vlasinske HPP, Limske HPP, HPP Ovčar Banja and HPP Međuvršje), are observed regarding the time interval up to 2020.

Key words: short circuit ratio, synchronous reactances, generator, revitalization

**THE GENERATOR SHORT CIRCUIT RATIO AND SYNCHRONOUS
REACTANCES DETERMINATION ACCORDING TO THE POWER SYSTEM
REQUIREMENTS**

Dragan P.Popović, Miloš Lj. Stojković