

## UTICAJ INTEGRACIJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA RAD HIDROELEKTRANA KAO POUZDANIH IZVORA FLEKSIBILNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Dr.sc. Faruk SERDAREVIĆ dipl.ing.maš,  
Stručnjak iz oblasti energetike, faruk.serdarevic@gmail.com

### REZIME

Porast udjela energije proizvedene iz obnovljivih izvora u finalnoj potrošnji je utjecao da pitanje fleksibilnosti elektroenergetskog sistema postane jedan od najvećih izazova za adekvatno upravljanje pogonom sistema. Zbog toga svi sistemi uključuju čitav niz fleksibilnih izvora (elektrana koje imaju brzi odziv) za upravljanje tom varijabilnošću, dok se sve više sistema oslanja i na skladišta energije, upravljanjem na strani potrošnje i interkonekcije sa susjednim tržištima odnosno sistemima električne energije. Međutim, postavlja se pitanje: može li se upotreba postojećih izvora efikasno poboljšati kako bi se uravnotežila sve veća varijabilnost kao odgovor na planiranu integraciju novih velikih količina promjenjive i teško predvidive obnovljive energije? Hidroelektrane su zbog svojih karakteristika, prvenstveno brzog odziva, tradicionalno korištene za pružanje pomoćnih usluga u sistemu. Međutim, novonastala situacija za hidroelektrane se, pored mogućnosti stvaranja dodatnih prihoda, reflektuje i u nastajanju dodatnih troškova, podnošljivih u datom trenutku, ali sa tendencijom značajnog rasta uslijed dodatnog trošenja opreme pri pružanju takvih usluga.

U ovom radu je napravljeno istraživanje fokusirano na unapređenje razumijevanja složenosti novog okruženja u kojem se odvija pogon elektroenergetskog sistema, novih zahtjeva i ciljeva energetske politike kao i problema optimiranja pogona hidroelektrana u novom okruženju u integraciji sa obnovljivim izvorima energije. Analiziran je konkretan primjer elektroenergetskog sistema sa postojećim i planiranim budućim hidroenergetskim i termoenergetskim objektima te pretpostavljenom većom integracijom intermitentnih obnovljivih izvora energije.

Analiza je pokazala da integracijom obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem praktički u svakom

sat u toku godine dolazi do promjene pogona hidroelektrane uzrokovane promjenjivošću proizvodnje električne energije u vjetroelektranama i fotonaponskim solarnim elektranama.

**Ključne riječi:** hidroenergija, tržište električnom energijom, reverzibilna hidroelektrana, fleksibilnost, obnovljivi izvori energije, varijabilnost, vjetroenergija, solarna energija

### UVOD

Integracija obnovljivih izvora energije (OIE) koja zbog svoje nepredvidive i isprekidane proizvodnje unosi dodatnu mogućnost debalansa između proizvodnje i potrošnje u realnom vremenu, pogotovo ako je udio obnovljivih izvora energije veći, a posebno ako je riječ o vjetroelektranama ili fotonaponskim solarnim elektranama čija je nepredvidivost proizvodnje najveća. Štaviše, u narednom periodu planirana je izgradnja izrazito velikog broja vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana praktički na svim kontinentima.

Po definiciji obnovljivi izvori energije su izvori energije koji se kontinuirano ili određenim ponavljajućim prirodnim procesima obnavljaju, pa se mogu trajno iskorištavati bez iscrpljivanja, kao npr. voda, vjetar ili sunce. Jedna od glavnih karakteristika proizvodnje električne energije iz OIE je da je teško predvidiva, pa dolazi do većeg ili manjeg odstupanja ostvarene od planirane proizvodnje električne energije iz OIE. Nastala odstupanja se trebaju minimizirati promjenom izlaznih snaga angažovanih generatora u ostalim elektranama ili pokretanjem dodatnih generatora odnosno potrebno je provesti regulaciju ili redispesiranje (preraspodjelu) proizvodnih jedinica u sistemu, što uzrokuje dodatne troškove i dodatna naprezanja opreme. Koje će elektrane i koji generatori sudjelovati u preraspodjeli, zavisi o njihovim tehničkim

i ekonomskim karakteristikama kao i mjestu priključenja.

Troškove takve regulacije, odnosno promjene proizvodnje na otvorenom tržištu bi trebao podmiriti tržišni učesnik koji je odstupanje uzrokovao. Pored toga, analize pogona OIE u realnom elektroenergetskom sistemu su pokazale da nesigurnost proizvodnje OIE može utjecati i na pojavu zagušenja u prijenosnoj mreži, što također operator sistema treba uzeti u obzir prilikom vođenja, upravljanja i razvoja svoje mreže. Zbog svega navedenog problem integracije OIE u elektroenergetski sistem uz istovremeno otvaranje tržišta električne energije značajno utiče na promjenu dosadašnjeg načina rada i poslovanja hidroenergetskih proizvodnih objekata.

### **DOSADAŠNJI I NOVI PRISTUP ANALIZE POGONA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA**

Brojni dosadašnji radovi analizirali su različite važne aspekte pogona i planiranja razvoja elektroenergetskog sistema, odnosno njegovog proizvodnog dijela sa i bez većeg prisustva hidroelektrana. To je uključivalo razvoj prvenstveno teoretskih matematičkih, zatim i računarskih modela, a u novim i drugačijim uvjetima poslovanja na tržištu električne energije i njihovo prilagođavanje novim okolnostima i varijablama.

Međutim, problem sigurnosti energetske sistema u eri ekonomske globalizacije te u političkom kontekstu evropskih integracija, otvaranja granica, ujednačavanja pravila poslovanja i natjecanja na otvorenom tržištu, ali i geopolitičkom utjecaju energetike izuzetno je složen i često izlazi iz okvira idealnih matematičkih modela.

S obzirom da se pojedini elementi ukupnih troškova elektroenergetskog sistema na tržištu električne energije više ne mogu računati kao ranije u monopolističkom, netržišnom okruženju, počeli su se postavljati neki drugi i drugačiji parametri i kriteriji dugoročnog planiranja razvoja sistema, a pogotovo njegovog proizvodnog dijela. Hidroelektrane kao zasebni investicioni projekti su posebno analizirani u mnogim radovima zbog njihove dvostruke uloge – njihova proizvodnja se smatra obnovljivim izvorom energije, ali u isto vrijeme imaju jednu od glavnih uloga kod pružanja pomoćnih usluga u elektroenergetskom sistemu, posebno kod regulacije radne snage i frekvencije (P/f regulacija).

Obzirom da je elektroenergetski sistem jedne države (ili jednog tržišta) jedinstven, režim ispuštanja vode na jednom akumulacijskom rezervoaru utječe na režime

rada ostalih rezervoara (i nizvodnih hidroelektrana) u sistemu te na angažiranje termoelektrana. Prema tome, pri optimiranju korištenja vode u akumulacijskim hidroelektranama treba promatrati cijeli elektroenergetski sistem bez obzira kakav se kriterij za optimizaciju korištenja sezonskih akumulacija primjeni.

Funkcija cilja se, do nedavno, najčešće formirala tako da minimizira ukupne troškove koji nastaju kroz promatrani period u elektroenergetskom sistemu zbog rada angažiranih hidroelektrana i termoelektrana. Minimum funkcije cilja značio je najmanje troškove proizvodnje, a time i optimalan plan rada elektrana sa aspekta sistema, ali ne i proizvodne kompanije ili pojedine hidroelektrane.

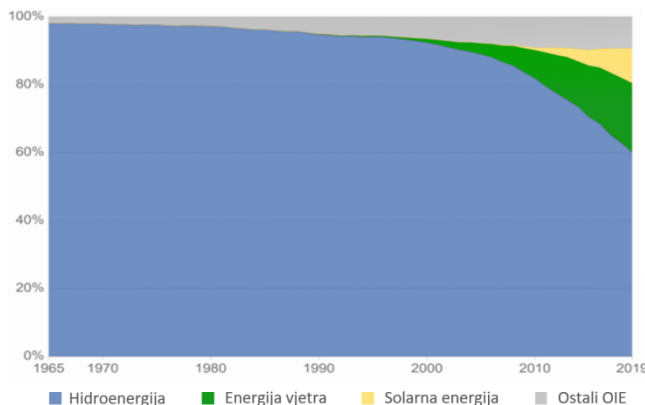
Kao što je već i spomenuto, restrukturiranjem elektroenergetskog sistema i liberalizacijom snabdijevanja i prodaje električne energije, cijena električne energije postaje vremenski dinamična veličina. Ona se mijenja u vremenu i može se razlikovati za pojedine osnovne vremenske jedinice. Stoga, nije dovoljno da se kroz funkciju cilja minimiziraju troškovi proizvodnje električne energije u sistemu, već je potrebno tražiti maksimalnu dobit od prodaje električne energije za konkretni objekt/proizvodnu kompaniju koja je predmet optimizacije.

Pri tome se dobit u svakoj vremenskoj jedinici računa kao razlika između ostvarenog prihoda od prodaje električne energije i troškova nastalih za proizvodnju te električne energije.

### **HIDROELEKTRANE U SINERGIJI SA OSTALIM OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE**

Po instaliranoj snazi i realizovanoj proizvodnji hidroelektrane su najveći obnovljivi izvor energije u svijetu. U 2019. godini 60% električne energije iz obnovljivih izvora proizvedeno je u HE (Slika 1). Osim uloge u pokrivanju potrošnje HE bez dileme imaju i ključnu ulogu u dekarbonizaciji elektroenergetskog sistema i poboljšanju njegove fleksibilnosti, posebno kod tržišta u razvoju gdje hidroenergija doprinosi sigurnosti snabdijevanja.

Uz višenamjensko korištenje akumulacija ovaj sektor paralelno jača i regionalnu saradnju, jer u mnogo primjera susjedni sistemi imaju vrlo slične hidrološke prilike što onda dovodi do potrebe međusobne koordinacije i optimizacije.



Slika 1. Svjetska proizvodnja OIE 1965-2019 (Izvor: International Energy Agency 2020)

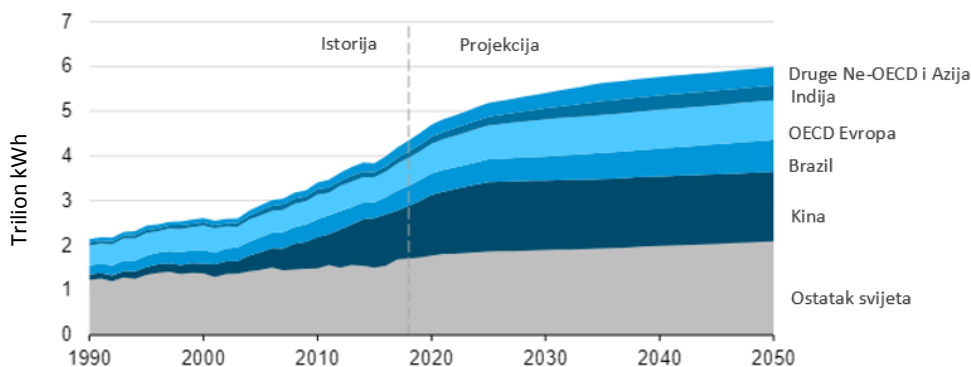
U zadnje vrijeme je došlo do znatnog tehnološkog napretka korištenja hidroenergije, uglavnom zbog kontinuiranog globalnog povećanja potrošnje električne energije, praćenog povećanim zahtjevima za promjenjivošću (fleksibilnošću) proizvodnje, skladištenjem energije te potrebom ublažavanja klimatskih promjena. Za potrebe ovog rada u Tabeli 1 iz prakse prikupljene su tipične pogonske vrijednosti (dakle, ne nominalne, projektirane) brzine odziva za pojedine vrste elektrana. Očito je da je brzina odziva tipičnih akumulacijskih HE pet puta veća od najbrže

gasne TE i iznosi 150 MW/min, pa je jasno zbog čega su HE ključne u osiguravanju fleksibilnosti sistema.

Tabela 1. Brzina odziva različitih elektrana

Vrsta elektrane	Tip	Brzina odziva / ramp-up rate (MW/min)
Nuklearna elektrana	-	4
TE na mrki ugalj	-	4
TE na lignit	-	3
TE na gas	parna turbina	6
	kombinovani ciklus (CCGT)	11
	otvoreni ciklus (OCGT)	30
HE	akumulacijska	150

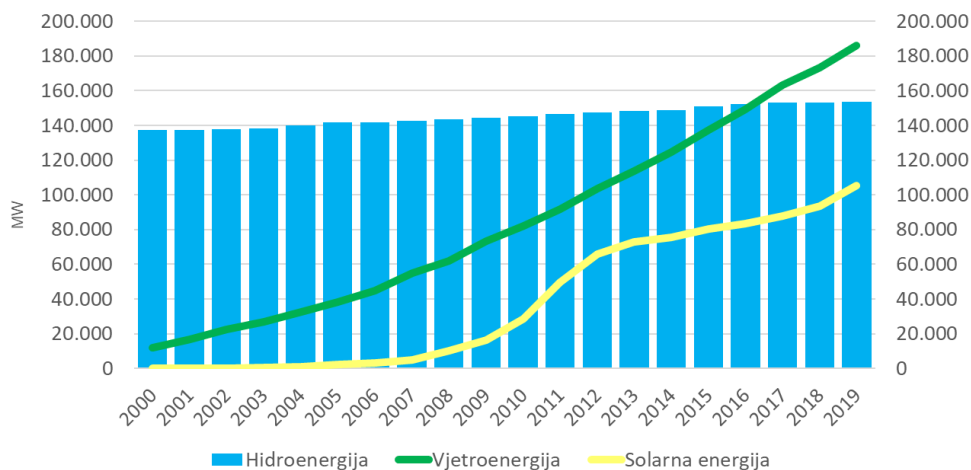
Na slici 2 prikazana je geografska disperzija ukupne svjetske proizvodnje HE u periodu 1990 - 2050. godina. U narednom periodu očekuje se daljnji, ali ipak usporeni rast proizvodnje HE. To je očekivano obzirom da su do sada ipak najizdašnije lokacije već iskorištene, a uslovi zaštite okoline su sve stroži, pogotovo u razvijenijem dijelu svijeta



Slika 2. Svjetska proizvodnja iz hidroelektrana (1990-2050) (Izvor: US Energy Information Administration; 2019)

Zbog rastućih ograničenja u zaštiti okoliša vrlo je teško realizirati nove velike HE, pa se korištenje hidroenergije uglavnom svodi na izgradnju novih malih HE, maksimalno korištenje postojećih (često već amortiziranih) velikih HE i reverzibilnih HE. Na slici 3 dole prikazan je očit stagnacijski trend razvoja novih

HE projekata u odnosu na projekte VE i SE u Evropi što može imati direktan negativan utjecaj na očekivanu integraciju novih OIE najviše zbog spomenute dominantne uloge HE u omogućavanju fleksibilnost sistema.



Slika 3. Stagnacija povećanja instalisanog kapaciteta HE u odnosu na eksponencijalni rast novih instalisanih kapaciteta VE i SE u EU (Izvor: Eurostat 2020)

**PREDNOSTI I NEDOSTACI KORIŠTENJA  
HIDROELEKTRANA ZA POTPORU VEĆE  
INTEGRACIJE OIE**

Analizirajući bitnu ulogu svih tipova hidroelektrana u EES-u, postojeće, već amortizovane, HE se može afirmativno povezati s niskim pogonskim (operativnim) troškovima, zbog čega se koriste i kod pokrivanja baznog i vršnog opterećenja sistema, a zbog svoje dvostruke uloge jeftinog, a fleksibilnog izvora značajno doprinose pouzdanosti energetskog miksa (operativni troškovi i troškovi održavanja su obično niski i nemaju potrebe za gorivom).

HE također imaju značajne prednosti u odnosu na druge konvencionalne izvore električne energije, jer je to čista i obnovljiva energija i izvor koji ne zagađuje okolinu poput elektrana na fosilna goriva. Treba imati u vidu da su veći hidroenergetski projekti gotovo uvijek i višenamjenski i da posjeduju veliki potencijal vodosnabdijevanja, navodnjavanja, navigacije (transporta), sporta i rekreacije, kao i upravljanja odbranom od poplava i suša.

Sinergijski potencijal HE i korištenja njihovog brzog odziva i potencijala skladištenja posebno se ističe u kombinaciji s drugim promjenjivim OIE, prvenstveno solarnim fotonaponskim elektranama (SE), npr. tokom večernjih sati vršnog opterećenja sistema kada nema proizvodnje SE, a potrošnja raste ili npr. balansiranje ukupne proizvodnje brzim odgovorom na minutne fluktuacije proizvodnje SE (tzv. balansiranje sistema).

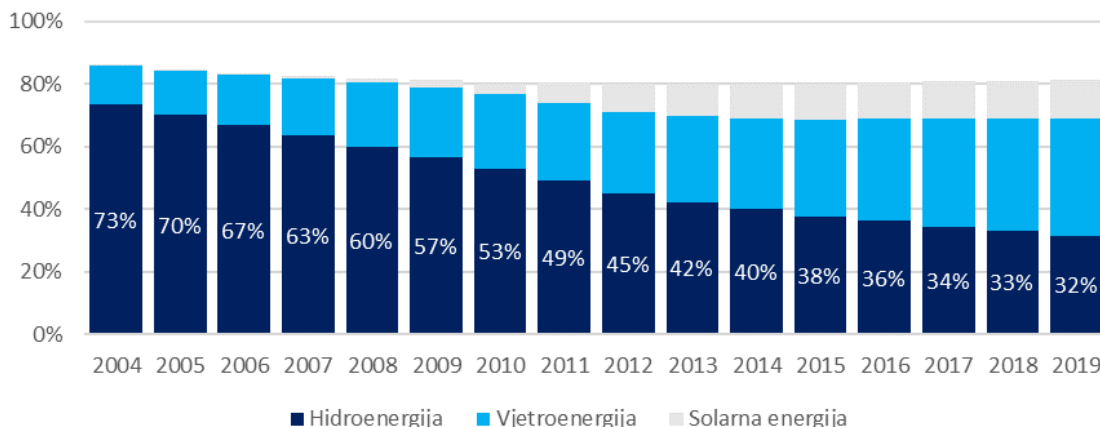
Tabela 2 - Prilike i izazovi sektora hidroenergije

Prilike	Izazovi
Regionalna saradnja	Dostupnost vode
Privlačenje domaćih tržišta	Nexus vode i energije
Poboljšanje energetskog miksa	Utjecaj klimatskih promjena
Otpornost na klimatske promjene	Međugranični konflikti

Korištenje hidroenergije treba promatrati holistički u kontekstu sa ostalim izvorima električne energije, a posebno sa OIE. Svi izvori energije imaju prednosti i nedostatke, ali obnovljivi izvori energije imaju relativno manji utjecaj na okoliš.

Dva najbrže rastuća izvora obnovljive energije, solarna i energija vjetra, čiji se rastući trend udjela u ukupnoj zastupljenosti OIE u odnosu na hidroenergiju jasno vidi na slici 4 dole također imaju određene prednosti i nedostatke, što odluku o načinu optimalne proizvodnje energije čini još težom i izazovnijom.

Eksponencijalan trenutni, ali i predviđeni rast korištenja energije vjetra i sunca za proizvodnju električne energije zahtjeva da se detaljno razmotri sinergija rada ova dva obnovljiva izvora energije sa hidroenergijom da bi se dobio uvid o tome koji izvor najbolje djeluje i u kojim situacijama.



Slika 4. Promjena udjela HE, VE i SE u ukupnom instalisanom kapacitetu OIE u EU (Izvor: Eurostat 2020)

Iako to u velikoj mjeri ovisi o dostupnosti obnovljivih izvora u određenoj regiji, usporedba rada tih izvora može dati odgovore koji je izvor najpotrebniji elektroenergetskom sistemu kada se uzimaju u obzir faktori poput klime, sigurnosti snabdijevanja i utjecaja na okoliš, ali i međusobni utjecaj proizvodnje iz tih izvora u jednom elektroenergetskom sistemu.

Zbog posebnog potencijala za sinergijsko djelovanje vjetroelektrana i hidroelektrana, mnoge zemlje istražuju priliku za integraciju vjetroelektrana i hidroenergetskih sistema kako bi se koordiniranim radom optimizirala njihova proizvodnja. Cilj je ostvariti takve pogodnosti kao što je smanjenje troškova pomoćnih usluga koje posebno zahtijeva korištenje energije vjetra.

Može se zaključiti da ova potencijalna sinergija između korištenja hidroenergije i korištenja promjenljive (isprekidane) energija sunca i vjetra bez ikakve dvojbe ističe ključnu ulogu hidroenergije za razvoj i buduće korištenje ostalih obnovljivih izvora energije, ali nameće i važna pitanja pravilnog vrednovanja dodatnog angažovanja svih vrsta hidroelektrana.

#### **VAŽNOST FLEKSIBILNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA I ULOGA HIDROELEKTRANA ZA PODRŠKU FLEKSIBILNOSTI**

Nakon deregulacije tržišta električne energije, pozicija i pristup proizvođača električne energije je radikalno izmijenjen. Raniji pristup gdje je "funkcija cilja" bila minimizacija troškova se izmijenio i na deregulisanom tržištu "funkcija cilja" za proizvođače električne energije je sada maksimizacija prihoda. Proizvodne

jedinice koje imaju mogućnost fleksibilne proizvodnje električne energije su u prilici da prilagode svoju proizvodnju zahtjevima na tržištu, odnosno promjenljivoj cijeni električne energije, i na taj način povećaju svoj prihod u odnosu na nefleksibilne proizvodne jedinice.

Vrijednost fleksibilnih proizvodnih jedinica će se vjerovatno još povećavati u budućnosti jer će se potreba za regulacijskim kapacitetom sa vremenom sve više i više povećavati s većom penetracijom proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, a posebno povećanjem udjela proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana i fotonaponskih solarnih elektrana.

Nekoliko "kandidata" se takmiči na tržištu električne energije kako bi zauzeli svoje mjesto u rješavanju debalansa koji nastaje između proizvodnje i potrošnje električne energije izazvane varijabilnošću proizvodnje električne energije iz OIE, a to su konvencionalna proizvodnja električne energije (koja radi u režimu promjenljivog angažmana), hidroenergija, skladištenje energije, upravljiva potrošnja i prekogranična razmjena energije sa drugim sistemima. Iako proizvodni kapaciteti za pokrivanje bazne potrošnje i dalje moraju biti stalno dostupni u elektroenergetskim sistemima koji se suočavaju s rastućim udjelom intermitentne proizvodnje, u narednom periodu će potreba za uslugama fleksibilnosti sve više rasti. Fleksibilnost bi trebala omogućiti elektroenergetskom sistemu da odgovori na kratkoročne promjene i promjene u realnom vremenu za balansiranje proizvodnje i potrošnje.

Hydroenergija je obnovljivi izvor energije koji je prilično jedinstven u načinu na koji omogućava značajnije skladištenje energije. Također, hidroelektrane su jedinstvene jer omogućavaju brze promjene u proizvodnji električne energije, što znači da mogu vrlo dobro pratiti i opterećenje, i odgovarati na tržišne signale (cijena). Tehnologija koja se primjenjuje se pouzdano koristi već decenijama i to je trenutno najčešća tehnologija skladištenja energije širom svijeta (preko 1300 GW globalno instaliranih kapaciteta svih HE od čega preko 150 GW RHE).

Hidroelektrane zbog svega toga imaju mogućnost da elektroenergetskom sistemu pruže širok spektar sistemskih usluga važnih za njegov rad, a neke od usluga, koje one mogu pružati elektroenergetskom sistemu su sljedeće:

- Sve vrste rezervi (FCR, FRR, RR);
- Mogućnost brzog pokretanja;
- Mogućnost „black starta“;
- Regulacija frekvencije;
- Podrška održavanju napona (QV podrška)
- Rotaciona rezerva;
- Aktivna i reaktivna snaga (proizvodnja, regulacija);
- Inercija.

Od trenutka zatvaranja trgovanja električnom energijom (eng. gate closure) na organizovanom tržištu do početka isporuke električne energije još uvijek postoji mogućnost da se pojavi značajna razlika između ugovorene proizvodnje i stvarne proizvodnje. Novonastale razlike (debalansi) se nastoje minimizirati od strane tržišnih učesnika koji ih prouzrokuju (npr. OIE proizvođači) kako bi smanjili svoje troškove debalansa i od strane operatora sistema koji ih nastoji minimizirati kako bi elektroenergetski sistem radio u zadanim parametrima, odnosno kako bi u svakom vremenskom trenutku bio izbalansiran i poštovao svoje rasporede prema mrežnoj interkonekciji. Tržišnim učesnicima je za ove akcije na raspolaganju unutarredno tržište (od završetka tržišta dan-unaprijed (eng. day a head) do početka rada balansnog tržišta (uobičajeno do sat prije početka isporuke)). Za upravljanje debalansima operator sistema koristi alate odnosno tržišta koji su posebno dizajnirani za otklanjanje debalansa u elektroenergetskom sistemu (balansno tržište i tržište pomoćnih usluga) gdje je, zbog sigurnosti sistema operator sistema uvijek jedna od

strana u svakoj transakciji (kupuje i prodaje balansnu energiju, kupuje rezervu, aktivira rezervu....).

Pored fleksibilnosti elektroenergetskog sistema, u njegovom budućem radu biće potrebna i rješenja za pružanje pomoćnih usluga.

## OPIS MODELA I POLAZNE PRETPOSTAVKE

Za analizu nove uloge hidroelektrana u elektroenergetskim sistemima u uvjetima otvorenog tržišta električne energije i značajnije integracije obnovljivih izvora energije detaljno su modelirana 2 elektroenergetska sistema sa okruženjem u kojem je također modelirano još 10 susjednih elektroenergetskih sistema.

Svaki sistem modeliran je sa svakim pojedinim generatorom, dalekovodom, transformatorom, uključujući i blok-transformatore i predstavlja realni elektroenergetski sistem i idealno tržište električne energije (tržišta još uvijek nisu potpuno otvorena, uz mnoštvo učesnika koji se još uvijek ne ponašaju potpuno tržišno, pa je potrebno napomenuti da se ti aspekti poslovanja ovdje ne uzimaju u obzir, već se pretpostavlja idealno tržište).

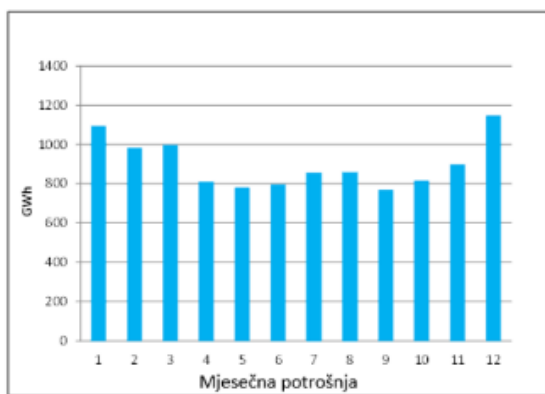
Korišteni su vrlo detaljni i ažurirani podaci dvaju EES-a unutar razmatranog regiona karakterističnih po nekoliko elemenata:

- sistemi su susjedni, dobro povezani interkonektivnim vodovima,
- potpuno su suprotnih proizvodnih portfolia: u jednom 100% HE, a drugom 100% TE,
- visok potencijal OIE postoji u oba sistema, pa se neki zaključci mogu tumačiti i u suprotnom smjeru,
- sistemi usporedivih veličina i životnog vijeka postojećih proizvodnih kapaciteta,
- sistemi koji su u procesu integracije tržišta električnom energijom kojom će ova nova uloga HE posebno doći do izražaja i u praksi.

Simuliran je rad elektroenergetskog sistema s vremenskim korakom od 1 sata za jednogodišnji vremenski okvir, poštujući sva tehnička ograničenja proizvodnih jedinica i sistema, kao što su minimalna vremena ulaska i izlaska elektrana, brzine promjene snage, cijene i raspoloživost goriva, dotoci, period održavanja, raspoloživost postrojenja itd.

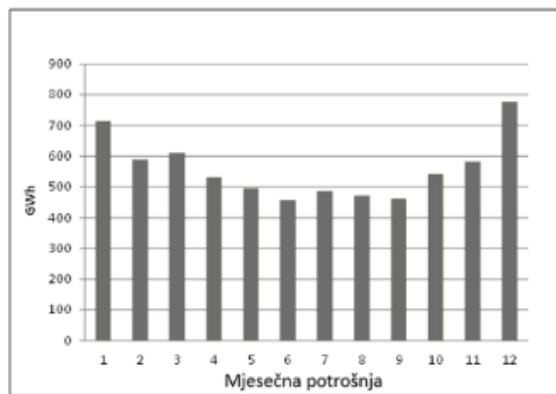
### Sistem H

- Dominiraju HE
- Profil opterećenja
  - Potrošnja raste u zimskim mjesecima
  - Sezonalnost HE ne koincidira dobro sa sezonalnošću profila opterećenja



### Sistem T

- Dominiraju TE
- Profil opterećenja
  - Manji nego u Sistemu H
  - Veća sezonalnost u mjesečnom profilu opterećenja



Slika 5. Karakteristike analiziranih Sistema

Ekvilibrijum između proizvodnje i potrošnje ovisi o mnogim parametrima kao što su dostupnost primarnih izvora energije, cijene goriva, strategije nadmetanja itd. Međutim, budući da se ova analiza odnosi na istorijsko razdoblje, glavni zadatak bio je adekvatno prilagoditi model tako da predstavlja već realizirane tržišne uslove i rad sistema u oba posmatrana sistema. Time se dobije potpuno vjeran i uvjerljiv model koji preslikava ostvareno stanje, pa se na tom modelu može provjeriti šta bi se zaista desilo da se u takvo okruženje instalira veća količina OIE.

Ovaj pristup rezultira marginalnom cijenom električne energije određenom po operativnim troškovima najskuplje jedinice na mreži u datom periodu. Na strani potrošnje, krivulja ponude potrošača je neelastična (ne mijenja se bez obzira na cijenu električne energije), što je još uvijek tipično na svim regionalnim tržištima električne energije.

Funkcija cilja u ovom problemu je u minimiziranje troškova koji uključuju:

- trošak goriva,
- varijabilne troškove rada generatora,
- trošak pokretanja generatora, itd.

Funkcija cilja mora poštovati neka ograničenja, poput onih postavljenih na iznos operativne rezerve, tehnička ograničenja generatora, ograničenja u prijenosu

električne energije postavljena na modeliranim vodovima, ograničenja postavljena na količine emisija, i razna druga koja se mogu postaviti u određenom modelu.

Provedena je satna analiza kojom se optimizira rad sistema tokom jedne godine, u određenim simulacijskim koracima. Rezultat simulacija je:

- raspored ulaska/izlaska proizvodnih jedinica iz pogona,
- njihova snaga u svakom pojedinom satu u toku promatrane godine,
- prekogranična razmjena električne energije,
- troškovi proizvodnje,
- cijene električne energije,
- kupovina/prodaja na tržištima i
- tok energije na pojedinim vodovima itd.

Model promatran u ovom slučaju sadrži detaljan prikaz svih proizvodnih jedinica u ukupno 12 sistema analiziranog regiona.

Hidroelektrane su dodatno agregirane i po slivovima. Sistemi koji okružuju promatrani region modelirani su kao vanjska spot tržišta, u kojima je tržišna cijena neosjetljiva na fluktuaciju cijena u promatranom regionu, a prenos energije je ograničen prijenosnim kapacitetima prekograničnih vodova.

Za potrebe ove analize simulirana su tri scenarija:

1. Rad Sistema T bez obnovljivih izvora kako bi se proučila promjena rada hidroelektrana, tačnije povećanje proizvodnje i ulazaka/izlazaka iz pogona, (polazni scenarij),
2. Rad Sistema T sa obnovljivim izvorima uz 150 MW solarnih FN elektrana i 250 MW vjetroelektrana (OIE scenarij),
3. Rad Sistema T sa obnovljivim izvorima uz 30 MW solarnih FN elektrana i 130 MW vjetroelektrana (konzervativni OIE scenarij).

Tabela 3. Instalirani kapaciteti po scenarijima

Tehnologija	Instalirani kapacitet (MW)	Instalirani kapacitet (MW) Konzervativni scenarij
Termo – lignit	1.308	1.308
Hidro	61	61
Vjetar	250	130
Solar	150	30

### REZULTATI ANALIZE

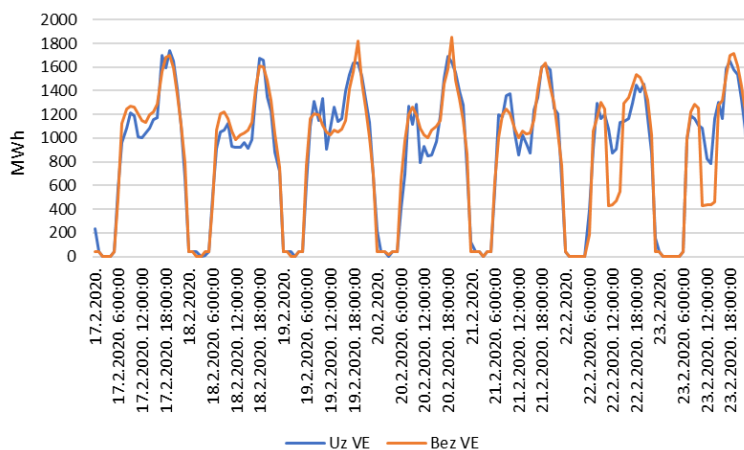
U ovoj analizi je korištenjem predložene metodologije i softverskog alata utvrđen utjecaj OIE u Sistemu T na promjenu rada HE u Sistemu H. To je posebno moguće usporediti pomoću broja ulazaka u pogon i izlazaka iz pogona promatranih hidroelektrana. Budući da se proizvodnja električne energije u Sistemu H sastoji samo od hidroelektrana, one su zadužene za „peglanje“ nestalne i nepredvidljive proizvodnje OIE. Zbog toga se

može primijetiti da u periodu u kojem OIE proizvode u većoj količini, ulazaka i izlazaka iz pogona HE ima više nego u periodu u kojem tog instaliranog kapaciteta OIE nema na mreži. Ukupna proizvodnja hidroelektrana kako je i očekivano u oba scenarija (sa i bez OIE) nije značajno različita, jer dolazi samo do vremenske preraspodjele hidroproizvodnje. Potrošnja električne energije jednaka je u oba scenarija, a proizvodnja OIE rezultira izbacivanjem TE iz pogona.

Akumulacijske hidroelektrane su modelirane pomoću mjesečnih dotoka te im model omogućuje da, koristeći te dotoke, optimiraju svoju proizvodnju, dok su protočne hidroelektrane modelirane koristeći fiksnu proizvodnju temeljenu na istorijskim podacima. Iz tog razloga u ovom modelu protočne hidroelektrane rade jednako u oba scenarija, dok se promjena primjećuje kod akumulacijskih hidroelektrana.

S obzirom na nestalnu proizvodnju vjetroelektrana, hidroelektrane moraju ulaziti i izlaziti iz pogona 722 puta više kako bi ujednačile tu nestalnost, kao što je i vidljivo iz tabele. To je moguće uočiti i na Slici 6 dole, koja prikazuje jednu sedmicu u promatranoj godini kao ilustraciju rada akumulacijskih hidroelektrana te razlike u skokovitoj proizvodnji. Može se uočiti kako je proizvodnja u oba scenarija vrlo slična, ali je u scenariju s vjetroelektranama prisutno puno više takvih skokova nego u scenariju u kojem nema instaliranog kapaciteta u vjetroelektranama.

Imajući u vidu da ove male promjene proizvodnje prate skokovite promjene cijene, mogu se očekivati promjene u ukupnim troškovima rada sistema.

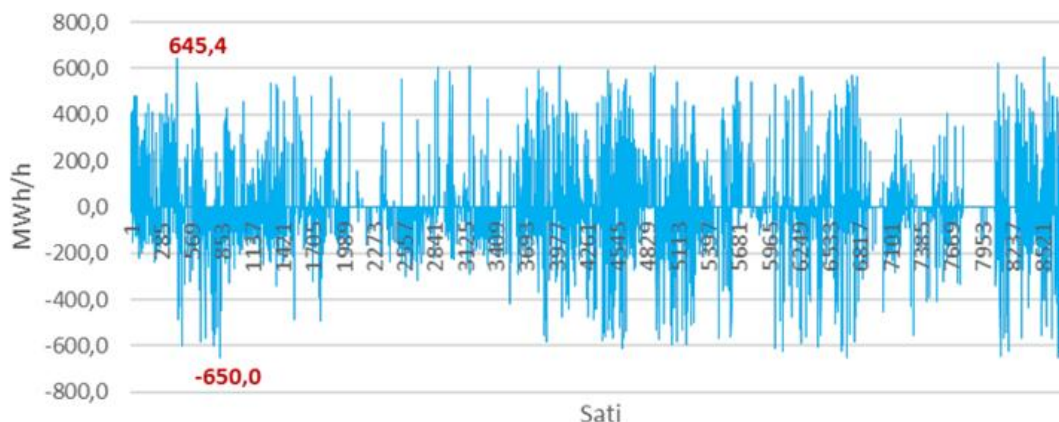


Slika 6. Proizvodnja akumulacijskih hidroelektrana u odabranoj sedmici



Na slici 7 prikazana je satna razlika prekogranične razmjene između promatrana dva sistema u varijantama sa i bez OIE u pogonu. Najveća razlika u odnosu na početno pogonsko stanje (dakle, bez OIE) iznosi oko

650 MWh/h u oba smjera, što pokazuje izrazito veliki utjecaj OIE na prekograničnu razmjenu ova dva sistema u kojima je vršno opterećenje samo par puta veće od te razlike.

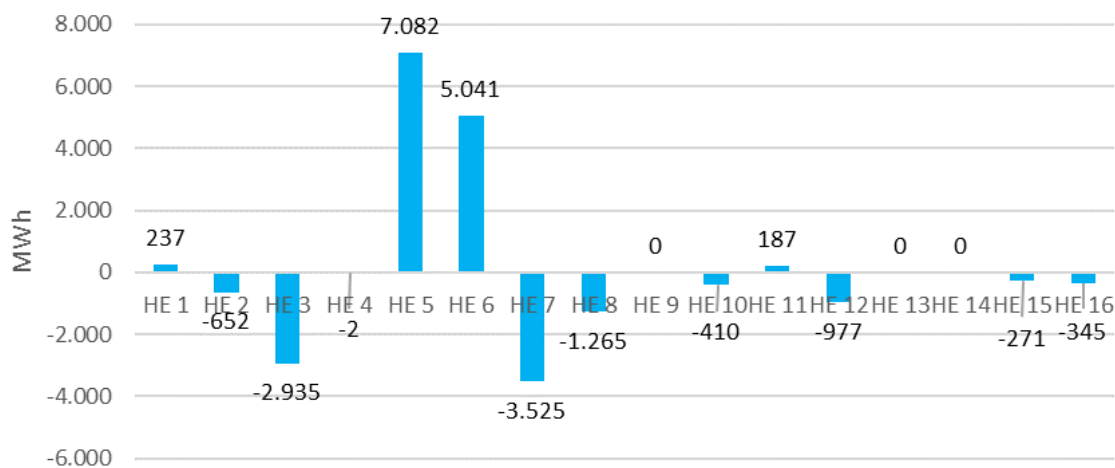


Slika 7. Satna razlika prekogranične razmjene između dva promatrana sistema sa i bez OIE u pogonu tokom jedne godine

Suma svih satnih razlika prekograničnih razmjena iznosi -52.6 GWh, uz prosječnu satnu razliku od -6 MWh/h. Međutim, za ovu priliku relevantnija je suma apsolutnih vrijednosti promatrane razlike prekogranične razmjene koja iznosi čak 582 GWh/god. To je energija ekvivalentna punoj baznoj proizvodnji (8760 sati godišnje) elektrane instalirane snage od 66 MW. Ovaj podatak najjasnije pokazuje koliko promjenu u bilansima sistema unosi integracija OIE, ne samo u smislu proizvodnje pojedinačnih objekata u EES, nego u smislu prekograničnih razmjena koje se onda po

principu spojenih posuda prenosi u okruženje koje je u ovom regionu izrazito dobro povezano interkonektivnim vodovima.

Očigledno je da integracija OIE ima utjecaj na svaku promatrane HE u Sistemu H, praktički u svakom satu jer je vrijednost krivulje na prethodnom grafu samo u nekoliko tačaka jednaka nuli. Ako se sumiraju sve te promjene po pojedinim HE dobije se ukupna razlika proizvodnje svake HE na godišnjem nivou kako je prikazano na slici 8.



Slika 8. Ukupna razlika godišnje proizvodnje svake promatrane HE u varijantama sa i bez instaliranih OIE (MWh/god)

## ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Uvođenje u EES značajnijih kapaciteta vjetroelektrana i fotonaponskih solarnih elektrana nepovoljno utiče na stabilnost i pouzdanost funkcionisanja EES. Razlog je izrazit stohastički karakter tih fenomena i teška predvidivost brzih promjena njihove pune raspoloživosti. Da bi se pouzdanost EES-a i u tim slučajevima održavala na zahtijevanom visokom nivou, neophodne su dodatne investicije u postrojenja koja obezbjeđuju fleksibilnost sistema, čiji troškovi moraju da budu uzeti u obzir pri razmatranju opravdanosti uvođenja u EES novih takvih jedinica OIE.

U skladu sa činjenicom navedenom u prethodnom stavu, prije izdavanja saglasnosti za realizaciju novih kapaciteta OIE (vjetro i fotonaponske elektrane), neophodno je napraviti tehno-ekonomsku analizu do kojih se granica smije povećavati udio tih proizvodnih kapaciteta u EES, i koje su prateće mjere moraju preduzeti da bi se održala neophodna pouzdanost i funkcionalna stabilnost mješovitog EES-a.

Povećanje pouzdanosti EES-a u uslovima većih kapaciteta vjetro i fotonaponskih elektrana ostvaruje se primjenom više mjera, od kojih su najbitnije: a) izgradnja novih kapaciteta elektrana najveće operativne mobilnosti: novih akumulacionih i reverzibilnih hidroelektrana, ili, gasnih elektrana; b) ojačavanje prijenosne mreže da bi se izbjegla zagušenja u uslovima novih kapaciteta OIE (vjetar, sunce) kod kojih se raspoloživost naglo i nepredvidljivo mijenja, što zahtjeva veoma česta i brza preusmjerenja tokova energije; c) izgradnja „skladišta energije“, kako bi se u periodima kada proizvodnja prevazilazi potrebe konzuma, moglo da skladišti energija, u nekom drugom, iskoristivom vidu (proizvodnja „zelenog vodonika“, elektrohemijsko skladištenje energije u baterijama, itd.).

Opravdanost i mogućnost uključivanja navedenih OIE mora se finansijski vrednovati sa aspekta troškova balansiranja i dogradnje mreže. Povećani troškovi balansiranja se sastoje od dvije komponente: potrebne rezerve snage (pomoćna usluga) i balansirajuće energije i obje je potrebno uzeti u obzir. Potreba za dodatnom rezervom snage i balansirajućom energijom zbog integracije OIE jako zavisi od lokacija i snaga novih intermitentnih OIE i karakteristika vjetra, odnosno insolacije te se ne može jednostavno uspoređivati među pojedinim zemljama.

Pronalaženje optimalnog nivoa ulaganja u dogradnju mreže zahtijeva ne samo investicije potrebne za rješenja kratkoročnih operativnih zahtjeva, već i dugoročnu održivost povrata troškova. Neizvjesnost u pogledu nivoa, vremena i vrste uvođenja obnovljive energije dodatno će zakomplicirati problem pronalaženja optimalnih nivoa ulaganja.

Neupitna je izvandredna prednost hidroelektrana i reverzibilnih hidroelektrana, sa stanovišta fleksibilnosti proizvodnje, jer su upravo one te koje obezbjeđuju pouzdanost i funkcionalnu stabilnost EES, a ujedno su u stanju da na najfleksibilniji način prilagođavaju svoju proizvodnju vrlo dinamično promjenljivim zahtjevima tržišta. To im na ekonomskom planu daje veliku prednost u odnosu na nefleksibilne proizvodne jedinice.

Rezultati simulacije prikazani u ovom radu su pokazali na razmatranim realnim sistemima da nestalnost proizvodnje OIE, zbog brzih promjena njihove raspoloživosti, moraju da prime na sebe isključivo hidroelektrane. U konkretnom razmatranom primjeru u kojem je udio vjetro i fotonaponskih elektrana bio skroman, nestabilnost proizvodnje OIE su „platile“ hidroelektrane, sa čak 722 dodatna ulaska i izlaska iz pogona u promatranoj samo jednoj godini zbog potrebe balansiranja promjenjive proizvodnje OIE.

## LITERATURA

- [1] Serdarević. F. (2021) Nova uloga hidroelektrana u elektroenergetskim sistemima u uvjetima otvorenog tržišta električne energije i značajnije integracije obnovljivih izvora energije, Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu (2021)
- [2] Crona.M. (2012) Evaluation of flexibility in hydropower stations. Uppsala Universitet. UPTec ES12001
- [3] Đorđević.B. (2001). Hidroenergetsko korišćenje voda. Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
- [4] Doujak.E. (2014). Effects of Increased Solar and Wind Energy on Hydro Plant Operation, HRW-HYDRO REVIEW WORLDWIDE
- [5] International Energy Agency. (2021): „Key World Energy Statistics 2020“, IEA, 2021

- [6] Acker.T. (2011). Issues, Impacts, and Economics of Wind and Hydropower Integration. IEA Wind Task 24 Final Technical Report, NREL/TP-5000-50181 December 2011
- [6] US Energy Information Administration. (2019). International Energy Outlook 2019 IEO 2019 Reference case (1990-2050)
- [7] Siemonsmeier, M., Baumanns, P., van Bracht, N., Schönefeld, M., Schönbauer, A., Moser, A., Dahlhaug, O. & Heidenreich, S. (2018). Hydropower Providing Flexibility for a Renewable Energy System: Three European Energy Scenarios. A HydroFlex report. Trondheim: HydroFlex

## IMPACT OF INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES ON HYDROPOWER PLANTS OPERATIONS AS RELIABLE SOURCES OF POWER SYSTEM FLEXIBILITY

by

PhD. Faruk SERDAREVIĆ B.Mech.Eng,  
Energy sector expert, faruk.serdarevic@gmail.com

### Summary

The increase in the share of energy produced from renewable sources in gross final consumption has made the issue of system flexibility one of the biggest challenges for adequate power system management. Therefore, all power systems include a range of flexible sources (fast response power plants) to manage this fluctuation, while an increasing number of systems also rely on energy storage, demand side management and interconnection with neighboring electricity markets/systems. However, the question arises as to whether the use of existing flexible sources can be effectively improved to balance increasing variability in response to the planned integration of large new amounts of renewable energy. Due to their primarily rapid response characteristics, hydropower plants have traditionally been used to provide ancillary services within the power system, however now, while generating added revenue, hydropower plants are creating extra costs, bearable for a given time, but unsustainable in the long term due to the additional wear of equipment in providing such services.

This paper focuses on improving understanding of the complex new environment in which the power system now operates, including new requirements and goals of energy policy, the problem of optimizing the operation of hydropower plants in the new situation of the considerable integration of renewable energy sources. It was analyzed the concrete example of a regional electricity system with existing and planned future hydropower and thermal facilities and the assumed greater integration of intermittent renewable energy sources. The analysis showed that the integration of renewable energy sources into the electricity system every hour of the year, changes the operation of hydropower plants caused by the variability of electricity production in wind farms and photovoltaic power plants.

Keywords: hydropower, electricity market, flexibility, renewable energy sources, variability, wind energy, solar energy

Redigovano 31.10.2021.